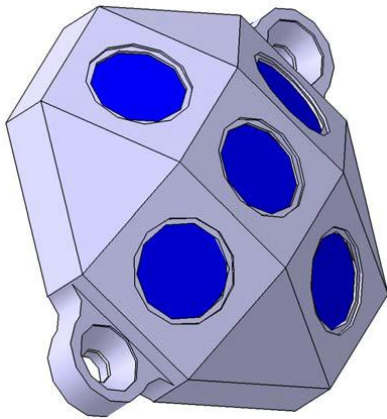


# Calibración en vuelo de los sensores solares de NanoSat-1B



Departamento de Arquitectura de Computadores y Automática

Trabajo Fin de Máster de Física Aplicada

Autor: Lorenzo Cercós Pita

Director: Prof. Segundo Esteban

- **Título:**

Calibración en vuelo de los sensores solares de NanoSat-1b

- **Título en Inglés:**

NanoSat-1b solar sensors calibration in flight

- **Alumno:**

Lorenzo Cercós Pita

lorenzo.cercos@gmail.com

- **Director:**

Segundo Esteban San Román

segundo@dacya.ucm.es

- **Palabras Clave:**

Sensor Solar – Modelado – Calibración – Optimización –  
Sistema de Control de Actitud (ACS) – Sistema Satelital

- **Palabras Clave en Inglés:**

Solar Sensor – Modeling – Calibration – Optimization –  
Attitude Control System (ACS) – Satellite System

- **Índice de Contenidos:**

Cap. 1.-	Introducción	Pág. 1
Cap. 2.-	Estado de partida	Pág. 3
Cap. 3.-	Objetivos del Trabajo	Pág. 11
Cap. 4.-	Modelado de las Células Solares por la UCM	Pág. 12
Cap. 5.-	Nueva Versión del Driver del Sensor Solar	Pág. 18
Cap. 6.-	Reajuste de la orientación de la Célula Solar SS14	Pág. 24
Cap. 7.-	Validación del Nuevo DriverSS-UCM en vuelo	Pág. 28
Cap. 8.-	Conclusiones	Pág. 32
Cap. 9.-	Trabajos Futuros	Pág. 34

## **RESUMEN**

---

Dentro de los programas I+D de pequeños satélites del departamento de Programas Espaciales y Ciencias de Espacio del INTA, se encuentra el satélite NanoSat-1b. Desde su lanzamiento, y con la colaboración de la UCM, el sistema de los sensores solares integrado en NanoSat-1b ha sido mejorado, consiguiendo un campo de visión total. Sin embargo, han mostrado una mala calibración en los valores del modelado, produciendo saltos en la dirección del vector Sol obtenida. En el presente trabajo se expone el procedimiento para la recalibración del sistema de sensores solares en vuelo.

Se contempla un modelado más preciso de las células solares. En consecuencia, se diseña una nueva versión del driver en coherencia con el nuevo modelado. Se incluye un estudio preciso sobre la irradiancia solar en el tiempo de misión de NanoSat-1b.

Una de las células solares presenta una desviación, no estimada en tierra. Para estimar dicha desviación, se lanza un proceso de optimización, utilizando el nuevo modelado y el la nueva versión de driver.

Finalmente se realiza una estimación de la precisión alcanzada en el sistema de sensores solares. La precisión conseguida con la recalibración de las células solares en vuelo para NanoSat-1b, demuestra la necesidad de un ajuste en vuelo.

## **ABSTRACT**

---

The NanoSat-1b satellite is part of the R&D Programmes in the field of Small Satellites, of the Space Programmes and Space Sciences of INTA. Since its launch, with the UCM collaboration, the solar sensors system has been improved, getting a complete field of view. However the first tests revealed some calibrations problems. Hence, the sun vector presented some discontinuities. This project has focused in the recalibration system of the solar sensors. An approach of calibrating the sensors on the flight is presented. A new version of the driver has been developed. This new version copes with all the problems of the previous one. A thorough solar radiation study is included.

Since one of the cells presents an unexpected deviation, an optimization process was introduced.

Finally an estimation of the precision of the solar sensor system is made. Experimental results confirm the validity of this calibration.

A todos aquellos que insistís en permanecer a mi lado  
pese a todos mis errores,  
Eternamente gracias

**AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, y no por una mera cuestión de protocolo, quisiera agradecer todas las oportunidades que me ha brindado el director del presente proyecto, el Prof. Segundo Esteban. No solo es el director de un proyecto fin de máster, sino el jefe/compañero en la labor que emprendemos en el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial. La oportunidad de haberme iniciado, y estar trabajando directamente en el sector espacial, es algo por lo que sin lugar a duda, siempre estaré agradecido.

Del mismo modo, quiero mostrar mi reconocimiento al departamento de Programas Espaciales y Ciencias del Espacio del INTA. Tanto mis compañeros, como al responsable de los programas de pequeños satélites, D. Manuel Angulo, han mostrado todo su interés y participación en todas las labores que planteamos y desempeñamos. Quisiera mostrar especial agradecimiento a Jorge Rivas, responsable de sensores, y a Raúl Blanco, responsable del centro de control, por el trabajo extra que han aportado para el presente proyecto.

Finalmente agradecer a todas aquellas personas que, durante la realización de este trabajo, se han empeñado en soportar a una persona con la mente sumida en las estrellas.

Todos aquellos que, al escuchar todas mis divagaciones, han asentido con la cabeza, y lo han acompañado con una sonrisa y un brazo sobre el hombro.

## ÍNDICE

1. Introducción .....	1
2. Estado de partida.....	3
2.1 Modelado de las Células Solares por INTA .....	3
2.1.1 Campaña de medición en el Spasolab.....	3
2.1.1.1 Irradiancia espectral del haz colimado en el Spasolab.....	4
2.1.2 Curvas de calibración y ajuste realizado en INTA.....	5
2.2 Driver del Sensor Solar (Versión INTA).....	6
2.3 Driver del Sensor Solar (Versión UCM). ....	8
3. Objetivos del Trabajo.....	11
4. Modelado de las Células Solares por la UCM .....	12
4.1 Datos medidos por Spasolab de los sensores SSA, SSB y SSC. ....	12
4.2 Detección de Sombras en Ejes Posicionador.....	13
4.3 Adaptación de datos para el análisis por célula.....	14
4.4 Linealidad del Voltaje frente a Coseno del Ángulo de Incidencia .....	16
4.5 Ajuste de la curva de Voltaje frente al Coseno del Ángulo de incidencia.....	17
5. Nueva Versión del Driver del Sensor Solar .....	18
5.1 Corrección de la señal de las Células para Atmósfera Cero (AM0).....	18
5.1.1 Irradiancia Solar Media en Atmósfera Cero. Ciclo Solar .....	19
5.1.2 Variación de la Irradiancia Solar durante el año. ....	20
5.1.2.1 Variación de la Órbita Terrestre. Excentricidad .....	20
5.1.2.2 Corrección de la irradiancia según el día del año. ....	20
5.1.3 Problemática en la corrección de la señal de las células solares. ....	22
5.2 Normalización y Obtención del Vector Sol según el Modelado por la UCM .....	23
6. Reajuste de la orientación de la Célula Solar SS14 .....	24
7. Validación del Nuevo DriverSS-UCM en vuelo.....	28
7.1 Apuntamiento al Sensor Solar SSA.....	28
7.2 Apuntamiento al Sensor Solar SSB .....	30
7.3 Apuntamiento al Sensor Solar SSC .....	31
8. Conclusiones.....	32
9. Trabajos Futuros .....	34
Bibliografía.....	35
Anexo .....	36



## **1. INTRODUCCIÓN**

Los programas de I+D en el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) en el campo de los pequeños satélites (20 – 150 Kg), comienzan en 1997, tras el lanzamiento del satélite MiniSat – 01. Desde entonces, y con el objetivo de mantener las actividades espaciales internas del INTA, y continuar formando ingenieros en el ámbito aeroespacial, se ha mantenido la línea que ha llevado al lanzamiento de los satélites NanoSat-01 y NanoSat-1b.

En el año 2008 el profesor Segundo Esteban, del Departamento de Arquitectura de Computadores y Automática, entra a colaborar con el Departamento de Programas Espaciales y Ciencias del Espacio del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, a colaborar del Subsistema de Control de Actitud (ACS) para el satélite NanoSat-1b. Tras su lanzamiento el día 29 de Julio de 2009, desde el cosmódromo de Baikonour, se consolida un grupo de trabajo de la UCM para el diseño e integración del ACS en satélites desarrollados por el INTA. El autor del presente trabajo participa en dicho grupo desde Agosto del 2009.

Desde el lanzamiento de NanoSat-1b se ha mejorado su ACS, disponiendo actualmente de un software completo integrado a bordo, con modos de apuntamiento al Sol, al campo magnético y al vector Nadir. Una vez adquirido el conocimiento, experiencia y datos suficientes, nos encontramos en disposición de optimizar el ACS en varios aspectos. En el presente trabajo se expone el estudio realizado sobre uno de los sensores involucrados en el ACS de NanoSat-1b, los sensores solares.

El sensor solar integrado en NanoSat-1b dispone de cinco células solares distribuidas según muestra la figura 1-1. En la figura 1-1 también se muestra la disposición de los sensores solares en ejes satélite (SBF). En caso de que el sensor sea excitado con radiación lumínica, cada una de las células solares informará de la cantidad de radiación recibida según modela la Ley de Lambert [Ref. 3].



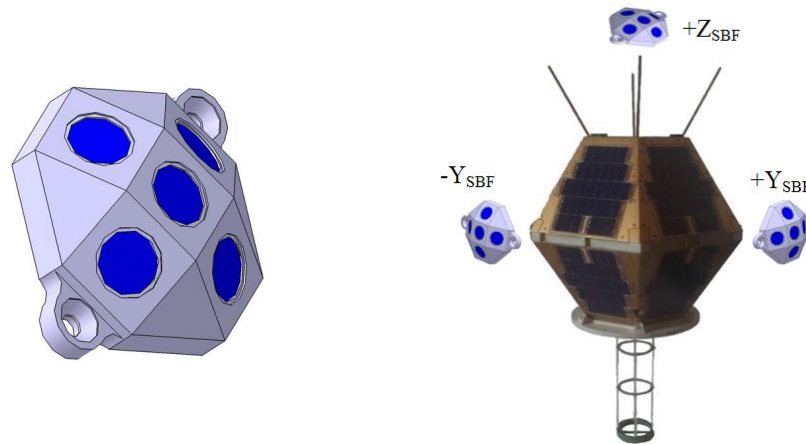


Figura 1-1.- Sensor solar de NanoSat-1b y su disposición en el satélite.

El trabajo que aquí se expone no parte de cero, por ello, y en primer lugar, se expondrá el estado de partida, mostrando especial interés en aquellos aspectos que han fomentado la realización del presente trabajo.

En consecuencia se detallan los objetivos que se plantea alcanzar en el trabajo, dedicando un capítulo a cada uno de ellos:

1. Modelado de las células solares por la UCM.
2. Nueva versión del driver del sensor solar.
3. Reajuste de la orientación de la célula SS14.
4. Validación del nuevo DriverSS-UCM en vuelo.

Para cumplir los objetivos planteados ha sido necesario documentarse a fondo sobre la materia relacionada e innovar sobre ella, tal y como se muestra a lo largo del trabajo. Finalmente se expondrán las conclusiones obtenidas sobre los objetivos alcanzados, y los trabajos futuros.

Los resultados obtenidos en el presente trabajo han abierto nuevas vías de investigación para los sensores solares, las cuales se continuarán desarrollando como parte de la colaboración mantenida con el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA).

## **2. ESTADO DE PARTIDA**

En este capítulo se pretende describir el estado de partida del presente proyecto. Los pasos realizados previamente a este trabajo fueron:

1. Modelado y calibración de las células solares por INTA.- En este proceso se modeló y calibró el comportamiento de las células solares integradas en los sensores solares.
2. Driver del sensor solar por INTA.- Este driver fue la primera versión que se integró en NanoSat-1b. Se expondrá la metodología utilizada junto con resultados reales.
3. Driver del sensor solar por UCM.- Este driver fue desarrollado para solventar la baja cobertura que ofrece el DriverSS-INTA. Esta versión fue integrada posteriormente en vuelo en NanoSat-1b. Se expondrá la metodología utilizada y resultados experimentales en vuelo.

### **2.1 MODELADO DE LAS CÉLULAS SOLARES POR INTA**

Previamente al diseño de un driver para el sensor solar (SS), que utilice la respuesta de las células para determinar la dirección del Sol, debe de realizarse un modelado del comportamiento de las células solares. Una vez modelado su comportamiento se deben estimar sus parámetros, a lo que denominamos calibración, para lo cual se realizó una campaña de medición en el Spasolab, INTA. La principal función del Spasolab es la calificación de células solares para el entorno del espacio según los estándares de la Agencia Espacial Europea (ESA).

#### **2.1.1 Campaña de medición en el Spasolab**

Para la calibración de las células solares se pretende obtener la respuesta de todos los sensores solares frente a un haz de luz colimada. Este haz de luz debe de incidir desde diferentes ángulos, haciendo un barrido de toda la semiesfera que envuelve el sensor. En la figura 2.1.1-1 se muestra un diagrama simplificado del mecanismo dispuesto para dichas medidas.

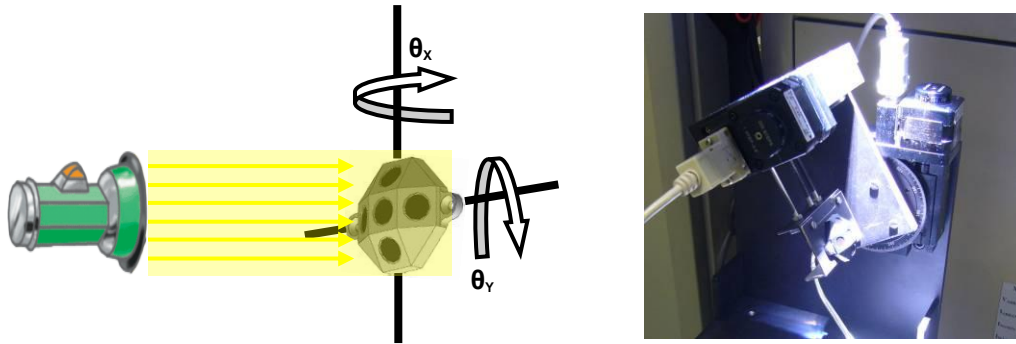


Figura 2.1.1-1.- Diagrama y fotografía del mecanismo para la captura de valores en toda la semiesfera

Se realiza entonces un barrido con respecto al SS de los ángulos  $\theta_x$  y  $\theta_y$  desde  $-60^\circ$  a  $+60^\circ$  con incrementos de  $5^\circ$ . El rango de medición es suficiente cuando se utiliza un sensor solar de forma independiente, con un FOV de  $120^\circ$  ( $\pm 60^\circ$ ). Sin embargo, de este modo no se consigue un barrido completo alrededor de cada una de las células solares, lo cual es necesario para ampliar la cobertura del ‘driver’.

#### 2.1.1.1 Irradiancia espectral del haz colimado en el Spasolab

Como es de suponer, el haz de luz deberá de simular la misma irradiancia que será recibida del Sol en órbita. Para verificar dicho comportamiento en el experimento, el laboratorio proporciona un análisis de irradiancia en el espectro de 199.5 nm a 10075 nm. Esta curva se compara con la curva de irradiancia esperada fuera de la atmósfera (calibrada en AM0). En las figuras 2.1.1.1-1 se muestra la curva de irradiancia espectral obtenida para el foco de luz colimada utilizado en el Spasolab, comparada con la curva esperada según AM0.

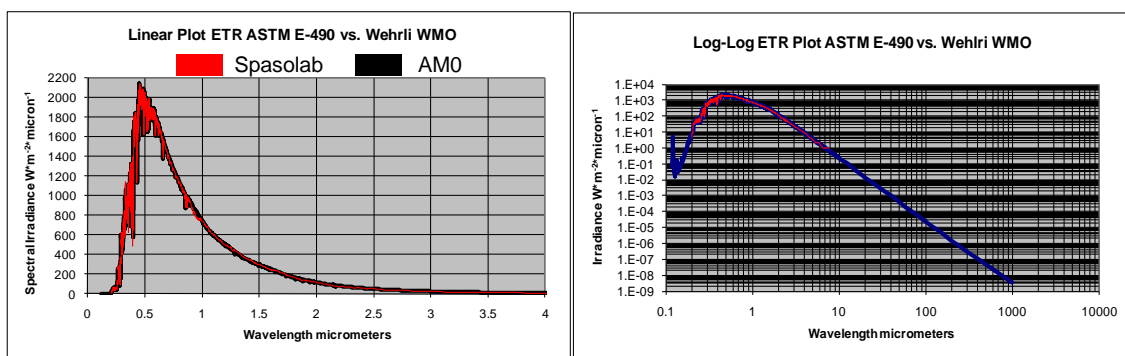


Figura 2.1.1.1-1.- Comparación de la irradiancia del Spasolab con la esperada en AM0 (lineal y logarítmica)

Esto asegura que las células solares han sido excitadas bajo un espectro de luz equivalente al solar en AM0.

### 2.1.2 Curvas de calibración y ajuste realizado en INTA

Mediante los valores tomados en la campaña de medición del Spasolab, se presentan las curvas de calibración realizadas para el modelado de las células solares. Las curvas presentadas en las figuras, al igual que los datos mostrados sobre los ajustes, han sido extraídas de la documentación interna existente sobre la calibración de las células solares [Ref. 1].

En la figura 2.1.2-1 se muestran las curvas de los datos obtenidos en el Spasolab para los tres sensores.

Para el modelado de la célula, se utilizó únicamente las dos curvas que pasan por su normal, una a  $\theta_X$  fijo y otra a  $\theta_Y$  fijo.

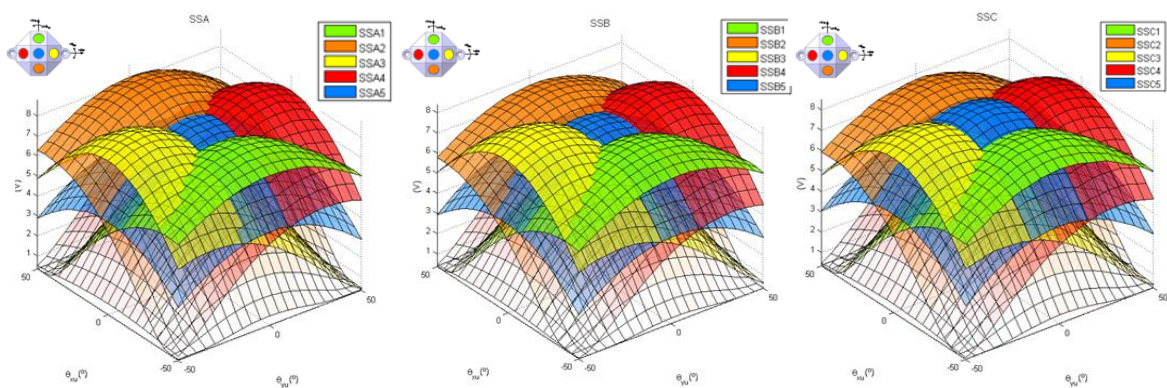


Figura 2.1.2-1.- Representación del voltaje obtenido en la campaña de medición del Spasolab.

El ajuste realizado se basa en el comportamiento descrito en la ley de Lambert [Ref. 3], aplicada a la respuesta de la célula solar dado un ángulo de incidencia. Dicha expresión se muestra en la ecuación [Ec. 2.1.2-1].

$$I = I_{MAX} \cdot \cos(\alpha) \quad [\text{Ec. 2.1.2-1}]$$

La respuesta en intensidad de la célula es transformada a voltaje por la electrónica de sensores según la ecuación [Ec. 2.1.2-2], por ello el ajuste es realizado según la ecuación [Ec. 2.1.2-3].

$$V = I \cdot Gan_{SS} + Voff_{SS} \quad [\text{Ec. 2.1.2-2}] \quad (V - Voff_{SS}) = (I_{MAX} \cdot Gan_{SS}) \cdot \cos(\alpha) \quad [\text{Ec. 2.1.2-3}]$$

Los resultados del ajuste realizado para la célula 1 se muestran en la figura 2.1.2-2.

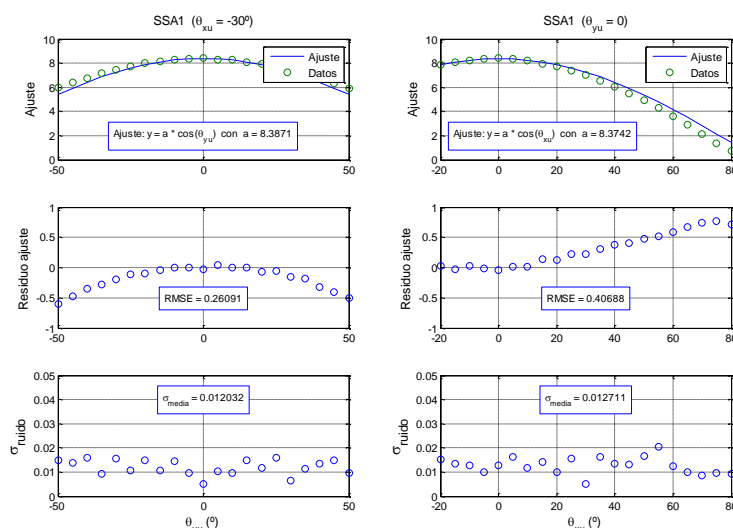


Figura 2.1.2-2.- Ajuste realizado para la célula solar 1, para  $\theta_X = -30^\circ$  y para  $\theta_Y = 0^\circ$ .

El ajuste realizado utiliza solo puntos con un bajo ángulo de incidencia ( $\pm 10^\circ$ ). Esto produce que a valores de incidencia altos, se comenta un error considerable. En la figura 2.1.2-2 para la curva de  $\theta_Y = 0$ , el ángulo de incidencia se extiende a  $80^\circ$ , donde se observa la desviación del modelo con el comportamiento real de la célula.

La representación equivalente, y los valores obtenidos en el ajuste, para el resto de células solares puede encontrarse en el documento *Procedimiento de calibración del sensor solar FM* [Ref. 1].

La electrónica de sensores también fue debidamente calibrada, para poder modelar la transformación de intensidad a voltaje. Los valores de ganancia y offset para el amplificador operacional, así como los resultados obtenidos en el ajuste realizado por el INTA, de la célula solar SS1 se muestran en la tabla 2.1.2-1.

$Gan_{SS1} = 0.5431; V_{Offset\ SS1} = 0.3491$
$(I_{MAX} \cdot Gan_{SS})_1 = 8.0316$

Tabla 2.1.2-1.- Valores de Ganancia y Offset de la electrónica de sensores.

Conocido el comportamiento de las células solares frente a la excitación lumínica prevista en el tiempo de misión, se puede proceder a diseñar un driver que maneje la respuesta de cada célula y estime la dirección del Sol.

## 2.2 DRIVER DEL SENSOR SOLAR (VERSIÓN INTA)

En el momento en que el grupo de ACS de la UCM entra a trabajar sobre el driver del sensor solar, ya existe una versión integrada. A continuación se muestra a groso modo la metodología utilizada por el driver. Por desgracia no existe documentación sobre este

driver, con lo que lo descrito a continuación ha sido extraído de la codificación encontrada del mismo y notas técnicas del autor [Ref. 2].

1. El driver del sensor solar recibe el valor de voltaje de las 15 células cada 2 segundos. Este valor de voltaje es transformado a su valor de intensidad según la conversión realizada por la electrónica de sensores [Ec. 2.1.2-2].
2. El valor de intensidad es filtrado según el valor máximo esperado de irradiancia durante el tiempo de misión de NanoSat-1b. Las intensidades que pasan el filtro, son normalizadas respecto a ese máximo. Teniendo la intensidad normalizada, dicho valor puede considerarse como la proyección del Sol sobre la normal de la célula.
3. Cada sensor solar determina un vector del Sol, haciendo uso de las células que han pasado el filtro de intensidad. Para ello se tienen precalculadas las matrices relacionadas con las combinaciones de tres, cuatro o cinco células. Para poder determinar el vector Sol en tres dimensiones, deben de recibir intensidad un mínimo de cuatro células, puesto que las tres coplanarias derivan en un sistema indeterminado.

Finalmente el resultado es acompañado de una bandera informativa. Esta bandera solo dará el aprobado en el caso de que el resultado cumpla ciertas condiciones:

- La célula  $+Z_{SS}$  debe de superar su intensidad mínima esperada durante el tiempo de misión de NanoSat-1b, es decir el Sol esta en el cono de visión del sensor.
- Un ecuación de compatibilidad que estima si hay presencia de albedo, que es una relación geométrica garantiza la incidencia de un único haz de luz. De este modo, el albedo puede ser detectado (no corregido) siempre y cuando no esté presente en las tres células.
- El módulo de Sol obtenido debe estar en un rango prefijado.

Para poder cumplir estas condiciones el Sol debe de encontrarse dentro de un cono de  $60^\circ$  respecto al sensor y recibir en tres células no coplanares. En la figura 2.2-1 se muestran resultados experimentales en vuelo del driver comentado.

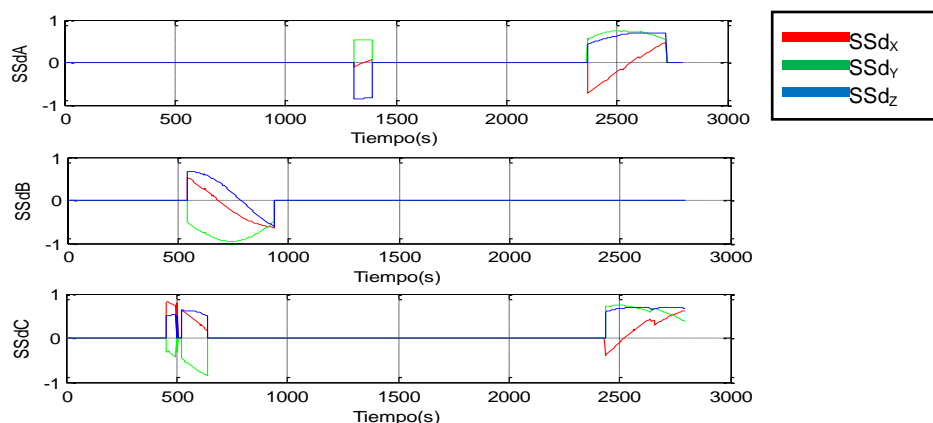


Figura 2.2-1.- Resultados experimentales del DriverSS-INTA.

Como se observa en la figura 2.2-1, el driver ofrece una medida de Sol válida carente del efecto de desviación del albedo. Sin embargo, esto es a cambio de no disponer de medida del Sol en la mayor parte del experimento. Fue este hecho el que fomentó un estudio sobre como conseguir una mayor cobertura.

### 2.3 DRIVER DEL SENSOR SOLAR (VERSIÓN UCM).

Con la intención de aumentar la cobertura de los sensores solares, se plantea generar una nueva versión del driver del sensor solar. Para ello, se rompe con la idea de sensores solares independientes, para pasar a manejar el conjunto de las 15 células solares. Así combinando células de diferentes sensores se consiguen zonas de visión para el conjunto de sensores solares que antes no existían. Esto incluye un interesante estudio sobre la selección de combinaciones óptimas a utilizar, que no es el objetivo de este trabajo. En la figura 2.3-1 se muestra la cobertura existente por el DriverSS-INTA y la cobertura con el DriverSS-UCM. La cobertura se representa imprimiendo sobre una superficie esférica que cubre a NanoSat-1b. En cada zona se indica por colores que nº de células recibirían radiación suficiente de un Sol procedente de esa dirección.

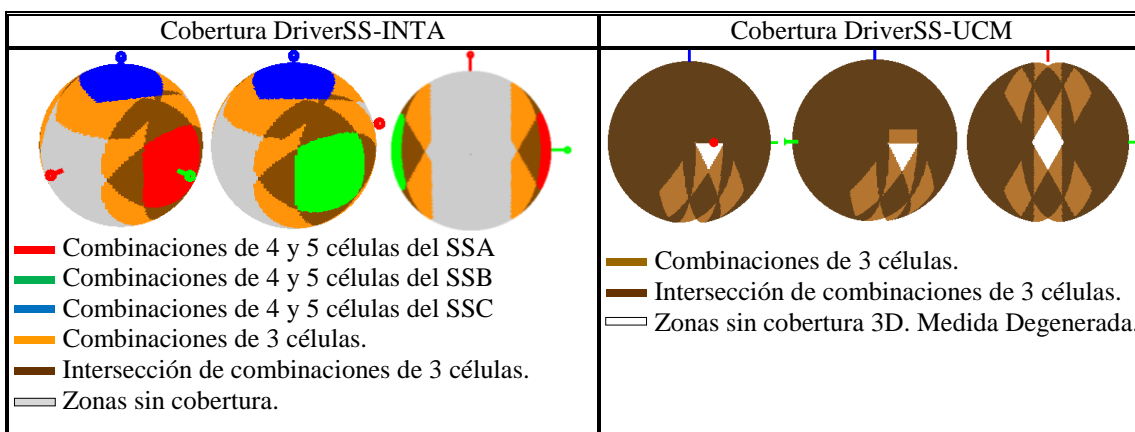


Figura 2.3-1.- Cobertura por DriverSS-INTA y cobertura por DriverSS-UCM.

Para conseguir la cobertura mostrada en el DriverSS-UCM el campo de visión de cada célula es necesario ampliarlo a  $\pm 80^\circ$ . De este modo solo quedan tres pequeñas zonas, en las que sólo se recibe con dos células proporcionando una medida del Sol degenerada (el centro de la zona degenerada).

Acorde a las combinaciones de tres células escogidas para conseguir la máxima cobertura, se tendrán precalculadas las matrices necesarias para obtener el vector Sol a partir de la intensidad normalizada de cada célula.

Se implementa un proceso de selección de combinación, en el que se incluye un lógica de selección por módulo de vector Sol obtenido. Esta lógica proporciona una escapatoria frente a sombras y albedo, lo cual es un valor añadido, pero hace que el tiempo de ejecución no sea siempre el mismo. Para asegurar una ejecución determinista se limitan las posibilidades de re-cálculo que ordena la lógica. En posteriores pruebas de verificación del Software se ha verificado que se cumplen los requisitos temporales.

Se mantienen los valores de ganancia y offset de la electrónica de sensores, para transformar la intensidad en voltaje.

No se pudo averiguar el estudio realizado para obtener los valores esperados de intensidad máximos y mínimos durante el tiempo de misión, con lo que se mantienen invariantes. Estos valores son los que representan el modelado de las células solares, puesto que son utilizados para normalizar la intensidad recibida por célula.

Anteriormente, cada sensor solar proporcionaba una dirección de vector Sol.

En la figura 2.3-2 se muestran resultados en vuelo del DriverSS-UCM. En ella se representa el resultado del DriverSS-UCM, el resultado del DriverSS-INTA para el sensor solar B y C, y la bandera informativa del DriverSS-UCM respectivamente.



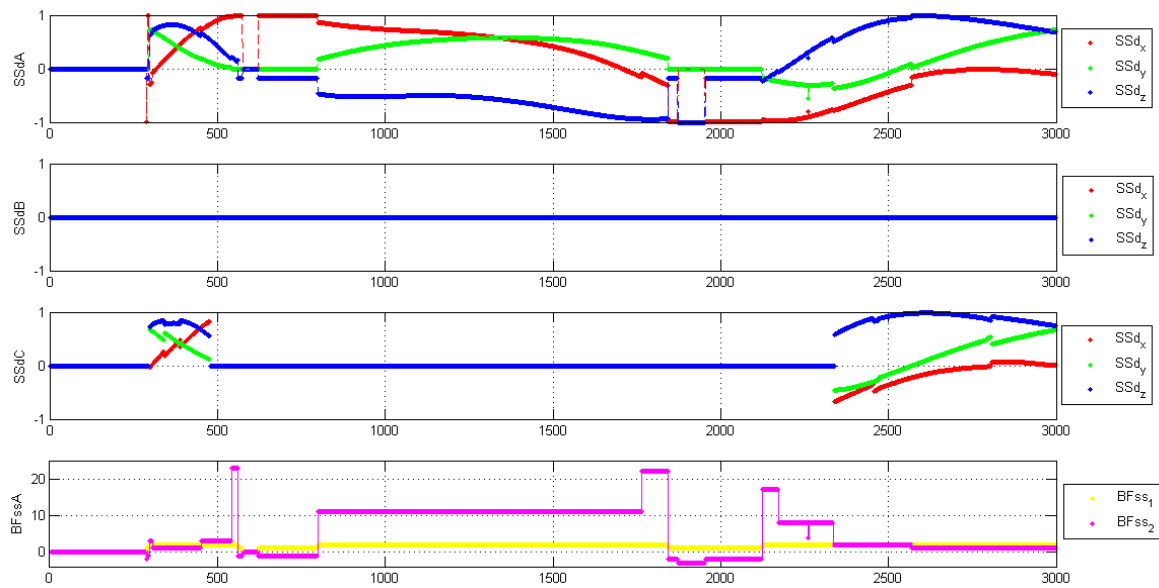


Figura 2.3-2.- Resultados en vuelo con el DriverSS-UCM integrado.

La bandera informativa del DriverSS-UCM consta de dos valores. BFss<sub>1</sub> informa de la calidad de la medida (0 → Incorrecto, 1 → Degenerada, 2 → Correcto). BFss<sub>2</sub> informa sobre el número de la combinación utilizada (BFss<sub>2</sub> de 1 a 24).

Como se observa, el nuevo driver aumenta la cobertura aportando medida durante todo el experimento. En aquellos momentos en los que el DriverSS-INTA también aporta medida, se verifica el correcto funcionamiento del DriverSS-UCM.

Tanto para el DriverSS-UCM como para el DriverSS-INTA, aparecen saltos al cambiar de una combinación de células a otra. Estos saltos se deben a errores de modelado y calibración que fomentaron la realización de este trabajo.

### 3. OBJETIVOS DEL TRABAJO

Los saltos presentes en el resultado del vector Sol al cambiar de una combinación a otra, fomentan un análisis del modelado y calibración de los SS. Se debe profundizar más en el modelado y calibración con el objetivo de **obtener mayor precisión y reducir los saltos presentes en la dirección del vector Sol** al cambiar de combinación de células.

Es necesario trabajar a diferentes niveles:

1. **Ajustar la calibración utilizando telemetrías de vuelo.** En el proceso de calibración los rangos estudiados no son suficientes y además el comportamiento de las células solares evoluciona con la vida de estas. Por ello es necesario recalibrar de nuevo realizando experimentos en vuelo. Con las telemetrías obtenidas en estos experimentos se realizará esta recalibración mediante un proceso de optimización.
2. Es primordial el encontrar una solución inicial lo más cercana posible a la solución óptima. Esto nos lleva a realizar un profundo análisis sobre la calibración de las células solares en tierra que se realizó antes del lanzamiento, y buscar **un proceso de calibración en tierra más preciso.**
3. La calibración realizada en tierra, se corresponde a la irradiancia solar media en atmósfera cero (constante solar). Por tanto, mediante un estudio de la irradiancia solar, se integra **un proceso de corrección para la señal de las células solares en función de la irradiancia dada según el tiempo universal.**
4. Además, en la fase de integración del satélite con el lanzador se detectó la desviación de una célula solar del sensor solar C, daño que no pudo ser subsanado. Por ello será necesario **estimar en vuelo la desviación de dicha célula.**

Estas mejoras implicarán un nuevo modelado de las células solares, y en consecuencia una actualización del driver para los sensores solares.

Finalmente se calificarán los resultados del reajuste realizado, estimando la precisión de medida conseguida con el trabajo realizado. Esto no es una tarea sencilla, pues en vuelo no se dispone de otro instrumento de medida que permita contrastar los resultados.

#### 4. MODELADO DE LAS CÉLULAS SOLARES POR LA UCM

En todo proceso de optimización, resulta muy relevante el punto del espacio de variables en el que iniciar el proceso de optimización. Por ello se comienza un profundo estudio sobre la mejora de la calibración de las células solares realizada antes del lanzamiento de NanoSat-1b.

Dicha calibración se encuentra expuesta en el apartado 2.1 *Modelado de las Células Solares por INTA*, donde se comentan los aspectos más relevantes de la campaña de calibración en el Spasolab. Para la última versión del DriverSS-UCM, se utilizan combinaciones de células de diferentes sensores, buscando el obtener el máximo campo de visión posible, esto requiere ampliar el rango de calibración de las células solares.

##### 4.1 DATOS MEDIDOS POR SPASOLAB DE LOS SENSORES SSA, SSB Y SSC.

Se ha realizado un barrido en  $\theta_X$  y  $\theta_Y$  de  $-60^\circ$  a  $+60^\circ$  con intervalos de  $5^\circ$  en cada paso. La respuesta de la célula solar a la excitación solar es de intensidad, sin embargo la electrónica de sensores realiza la conversión a voltaje. Para obtener la intensidad será necesario deshacer la conversión mediante la ecuación [Ec. 2.1.2-2].

En la figura 4.1-1 se representan las intensidades obtenidas para los sensores SSA, SSB y SSC. Dichos valores han sido proporcionados en formato hoja de Excel, de donde son leídos e interpretados directamente desde Matlab®.

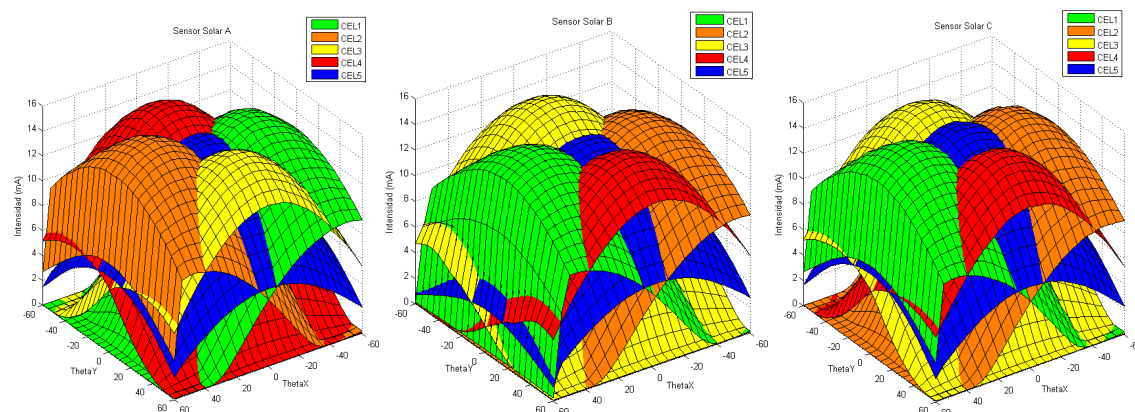


Figura 4.1-1.- Respuesta de los sensores solares frente a la excitación de radiación lumínica correspondiente a AM0.

Como primera observación, se puede comprobar que el sensor SSA se colocó rotado  $180^\circ$  respecto a SSB y el SSC. Esto es corregido modificando las normales de las células de SSA.

Otra anomalía presente, es la caída de la señal en las medidas tomadas cerca de  $\theta_X = +60^\circ$ . Esto fue debido a una sombra producida por el propio mecanismo de

posicionamiento (véase Fig. 2.1.1-1). Para poder detectar el efecto de una sombra y descartar valores alterados, se realizará un ajuste para cada una de las curvas disponibles (para  $\theta_X$  fijo y para  $\theta_Y$  fijo). En la figura 4.1-2 se muestran los dos conjuntos de curvas disponibles para el caso del SSA.

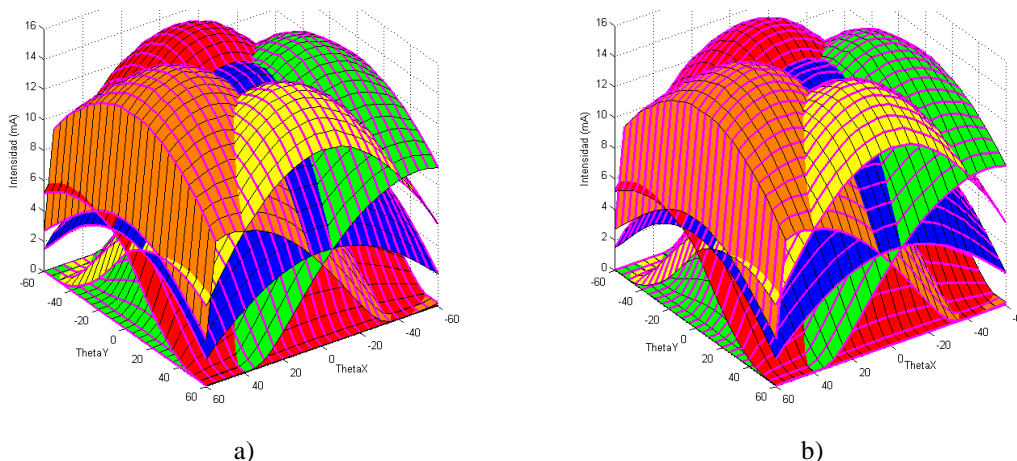


Figura 4.1-2.- Conjunto de curvas para los ajustes a  $\theta_X$  fijo (a) y conjunto de curvas para los ajustes a  $\theta_Y$  fijo (b).

En el apartado siguiente se presenta el proceso para la detección de sombras, en las curvas mostradas en la figura 4.1-2.

## 4.2 DETECCIÓN DE SOMBRAS EN EJES POSICIONADOR

Para detectar y eliminar las curvas en las que existan efectos de sombra, se realiza un ajuste de las curvas a  $\theta_X$  y a  $\theta_Y$  fijos. Este ajuste se basa en un modelo de la respuesta de la célula, lineal al coseno del ángulo formado entre el haz de luz incidente y la normal de la célula ( $\alpha$ ).

$$I = p1 \cdot \cos(\alpha) + p2 \quad [\text{Ec. 4.2-1}]$$

El modelo mostrado en la ecuación [Ec. 4.2-1], para el comportamiento de las células solares, presenta una importante modificación frente al expuesto en el apartado 2.1.- *Modelado de las células solares por INTA*. Para materiales Lambertianos [Ref. 3] el término  $p2$  debería ser nulo. Pero como veremos en los ajustes, no estamos tratando con materiales Lambertianos o perfectos, y la presencia de dicho término resulta fundamental para un correcto modelado de las células solares.

Por otro lado, los datos facilitados por el Spasolab se encuentran en ejes propios del sistema de posicionamiento:  $[X, Y, Z] = [\text{eje de rotación de } \theta_X, \text{eje de rotación de } \theta_Y, Z]$ .

Para obtener el ángulo de incidencia sobre cada célula ( $\alpha$ ), deberemos de expresar la normal de todas las células según los ejes propios del sistema de posicionamiento (Tabla 4.2-1).

normSSA = [ 0    sind(30)    cosd(30); 0    -sind(30)    cosd(30); sind(30)    0    cosd(30); -sind(30)    0    cosd(30); 0    0    1 ];	normSSB = [ 0    -sind(30)    cosd(30); 0    sind(30)    cosd(30); -sind(30)    0    cosd(30); sind(30)    0    cosd(30); 0    0    1 ];	normSSC = [ 0    -sind(30)    cosd(30); 0    sind(30)    cosd(30); -sind(30)    0    cosd(30); sind(30)    0    cosd(30); 0    0    1 ];
--	--	--

Tabla 4.2-1.- Normales de las células expresadas en ejes propios del sistema de posicionamiento.

Como se observa, las normales del sensor SSA se encuentran rotadas  $180^\circ$  en +Z respecto a los sensores SSB y SSC, tal y como refleja la figura 4.1.1-1.

En la figura 4.2-1 se representan el conjunto de ajustes realizados para cada una de las curvas, tanto para  $\theta_X$  fijo como para  $\theta_Y$  fijo, correspondiente a la célula 6. En la gráfica se representan los valores de p1 y p2, así como el coeficiente de correlación.

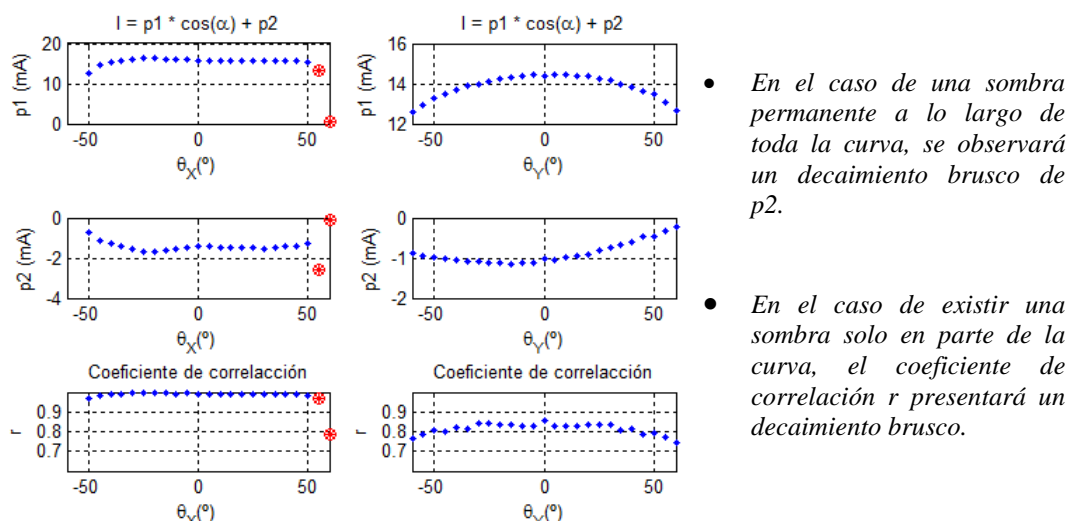


Figura 4.2-1.- Ajustes a  $\theta_X$  fijo y  $\theta_Y$  fijo en célula 6, con el objeto de comprobar sombras durante el

De esta forma se podrán evitar las zonas de sombras para el resto del análisis.

La representación equivalente de la figura 4.2-1 para el resto de células se encuentra en el Anexo, apartado 2.- Evaluación de las curvas a  $\theta_X$  y  $\theta_Y$  fijos para todas las células.

### 4.3 ADAPTACIÓN DE DATOS PARA EL ANÁLISIS POR CÉLULA

Una vez eliminadas las curvas bajo el efecto de las sombras, ya no resulta de interés el manejo de los datos en ejes posicionador. Es por ello que se transforman todos los datos a Voltaje frente al ángulo de incidencia. Para ello se hará uso de las normales de las células en ejes posicionador, las cuales se muestran en la tabla 4.2-1.

Inicialmente se ha manejado la intensidad, pues resulta ser la respuesta natural de la célula solar a una excitación lumínica, y por ello la variable para modelar el comportamiento. Sin embargo, para ello necesitaríamos tener la certeza de que la transformación de intensidad a voltaje por la electrónica de sensores no ha sufrido ninguna variación desde el lanzamiento. Afortunadamente, el modelar la electrónica de sensores junto con la célula solar, mantiene la linealidad tal y como se muestra en la ecuación [Ec. 4.3-1].

$$\left. \begin{aligned} V &= I \cdot Gan + OffSet \\ I &= p1 \cdot \cos(\alpha) + p2 \end{aligned} \right\} V = (p1 \cdot Gan) \cdot \cos(\alpha) + (p2 \cdot Gan + OffSet)$$

$$V = p1' \cdot \cos(\alpha) + p2' \quad [\text{Ec. 4.3-1}]$$

En la figura 4.3-1 se representa el conjunto de datos de intensidad frente a ejes posicionador, y el resultado de su transformación a voltaje frente a ángulo de incidencia para la célula 1. También se representa el voltaje frente al coseno del ángulo para observar la linealidad.

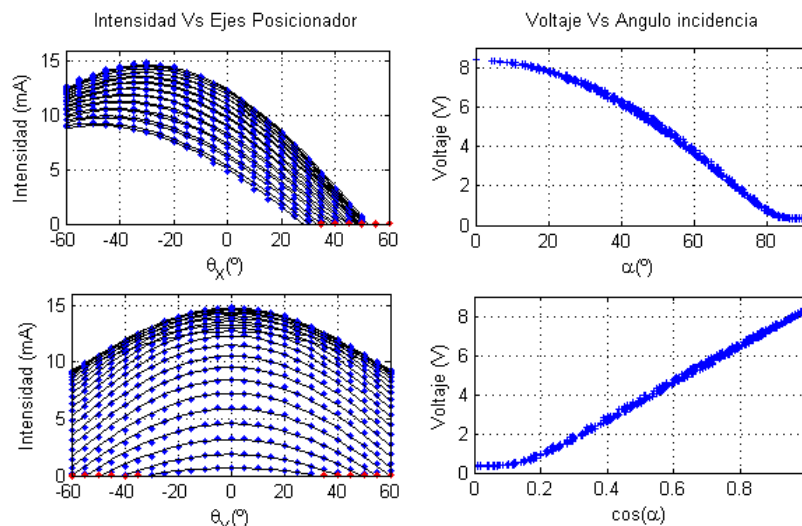


Figura 4.3-1.- Transformación de datos a voltaje frente a ángulo de incidencia para la célula 1.

La gráfica que representa el voltaje frente al coseno del ángulo de incidencia en la figura 4.3-1 nos corrobora la suposición de que el modelado de la célula solar no debe de realizarse conforme a un material Lambertiano, y que se corresponde a la ecuación [Ec. 4.3-1].

También se observa la pérdida de la linealidad para ángulos de incidencia cercanos a  $\pm 85^\circ$ . Este aspecto será discutido con detalle en el apartado siguiente.

#### 4.4 LINEALIDAD DEL VOLTAJE FRENTE A COSENO DEL ÁNGULO DE INCIDENCIA

Como muestra en la figura 4.3-1, la linealidad del voltaje frente al coseno del ángulo de incidencia se pierde para ángulos grandes. Con el objetivo de estimar dicho ángulo de incidencia, se realiza un ajuste lineal del voltaje frente al coseno del ángulo de incidencia, para ángulos de 0 a 60°. Utilizando este ajuste, se comparan los valores medidos en el proceso de calibración, con los valores dados por este modelo. En la figura 4.4-1 se representa el error relativo cometido por el modelo para la célula 6. La representación equivalente a la figura 4.4-1 para el resto de células puede encontrarse en el Anexo, apartado 2.- Error relativo cometido por el modelo de célula solar.

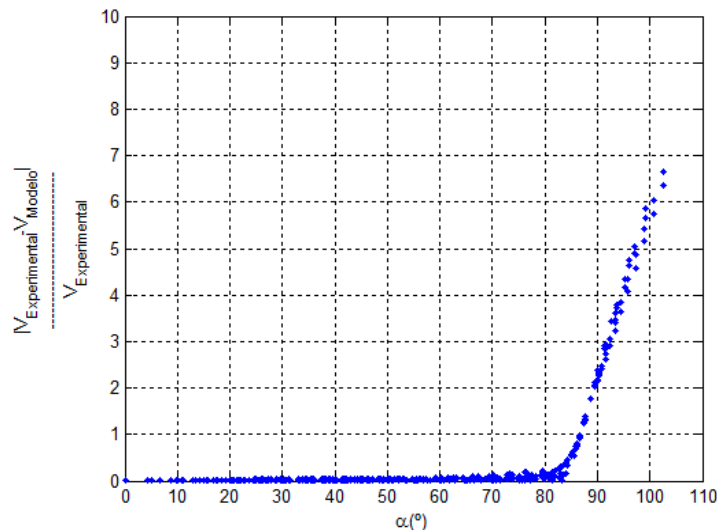


Figura 4.4-1.- Error Relativo cometido por el modelo de célula solar, para la célula 6.

Como se observa, el ángulo para el cual se dispara el error es aproximadamente de 80°, que se corresponde con el campo de visión de las células con el cual se consigue la máxima cobertura (véase Fig. 2.3-1). El efecto de la pérdida de la linealidad antes de los 80° no resulta reconocible, puesto que queda camuflado por la dispersión de puntos en la medida.

La curva de la no linealidad hasta los 90° puede modelarse mediante el ajuste de una ecuación polinómica de grado  $n$ , tal y como describe el modelo de Phong Modificado [Ref. 4] para elementos no Lambertianos. La energía absorbida por la célula podría entonces modelarse por la ecuación [Ec. 4.4-1].

$$E = E_{MIN} + E_{MAX1} \cdot \cos(\alpha) + E_{MAX2} \cdot \cos(\alpha)^n \quad [\text{Ec. 4.4-1}]$$

Sin embargo, tal y como se ha comentado anteriormente, para ángulos de incidencia menores al campo de visión de la célula solar ( $\pm 80^\circ$ ) la aportación del término cuadrático queda camuflado por la propia dispersión de la medida (véase Fig. 4.5-1).

#### 4.5 AJUSTE DE LA CURVA DE VOLTAJE FRENTE AL COSENO DEL ÁNGULO DE INCIDENCIA

En este apartado se realizará un ajuste lineal del Voltaje frente al coseno del ángulo de incidencia. Sin embargo, no utilizaremos todos los valores para realizar el ajuste. Puesto que el campo de visión de la célula solar ha sido fijado en  $\pm 80^\circ$ , descartaremos aquellos valores con ángulos superiores. Del mismo modo, y con el objetivo de modelar correctamente la respuesta de la célula en los cambios de combinaciones, solo se utilizarán los puntos con un ángulo de incidencia superiores a  $50^\circ$ .

En la figura 4.5-1 se muestra el ajuste realizado para la célula 6, donde se representa voltaje frente a ángulo de incidencia, y frente al coseno del ángulo de incidencia.

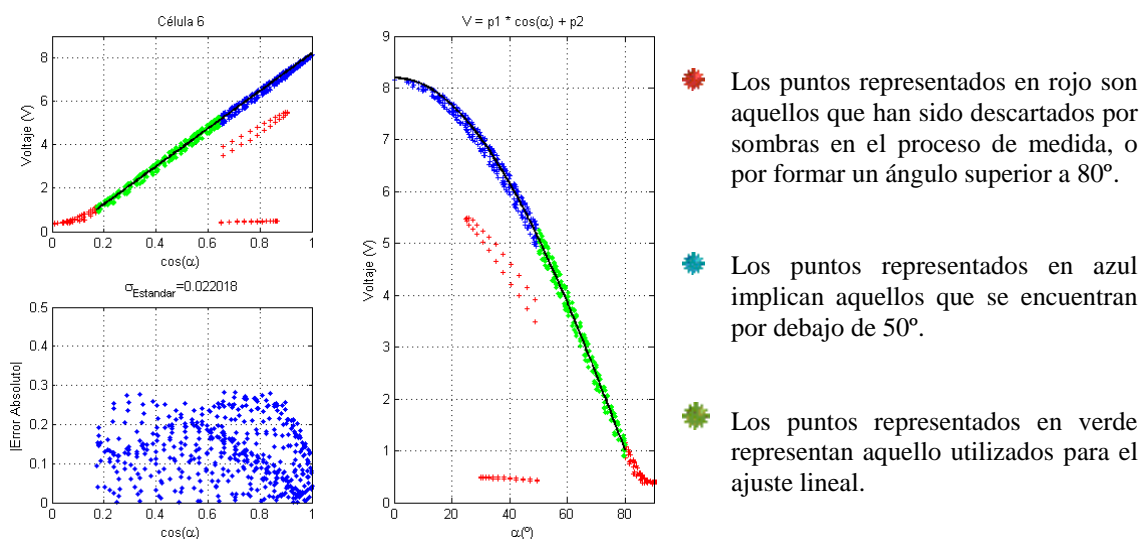


Figura 4.5-1.- Ajuste para la célula 6, de voltaje frente a coseno del ángulo de incidencia.

También se muestra la desviación estándar entre el modelo y las medidas reales, y se representa el valor absoluto del error cometido. En este se puede evaluar la calidad del ajuste, y también comprobar el efecto de la no linealidad cerca de los  $80^\circ$ . Como se puede comprobar, antes de los  $80^\circ$  no resulta significativa y queda camuflada por la propia dispersión de las medidas.

La representación equivalente a la figura 4.5-1, para las 15 células puede encontrarse en el Anexo, apartado 4.- Ajuste del Voltaje frente al ángulo de incidencia para las 15 células.



En la tabla 4.5-1 se muestran los valores obtenidos para los ajustes comentados en el actual apartado, correspondientes a la ecuación [Ec. 4.3-1].

$V = p1 \cdot \cos(\alpha) + p2$		
Sensor A	Sensor B	Sensor C
<u>Célula 1:</u> $\sigma_{\text{Estándar}} = 0.0087$ $p1 = 9.3909$ $p2 = -1.0184$	<u>Célula 6:</u> $\sigma_{\text{Estándar}} = 0.0220$ $p1 = 8.6964$ $p2 = -0.4893$	<u>Célula 11:</u> $\sigma_{\text{Estándar}} = 0.0069$ $p1 = 9.1739$ $p2 = -0.8773$
<u>Célula 2:</u> $\sigma_{\text{Estándar}} = 0.0031$ $p1 = 9.7325$ $p2 = -1.0266$	<u>Célula 7:</u> $\sigma_{\text{Estándar}} = 0.0382$ $p1 = 8.9320$ $p2 = -1.0601$	<u>Célula 12:</u> $\sigma_{\text{Estándar}} = 0.0168$ $p1 = 8.8753$ $p2 = -0.8730$
<u>Célula 3:</u> $\sigma_{\text{Estándar}} = 0.0090$ $p1 = 9.8025$ $p2 = -1.1784$	<u>Célula 8:</u> $\sigma_{\text{Estándar}} = 0.0172$ $p1 = 9.0421$ $p2 = -0.5645$	<u>Célula 13:</u> $\sigma_{\text{Estándar}} = 0.0020$ $p1 = 9.2476$ $p2 = -0.8538$
<u>Célula 4:</u> $\sigma_{\text{Estándar}} = 0.0009$ $p1 = 9.4288$ $p2 = -0.8625$	<u>Célula 9:</u> $\sigma_{\text{Estándar}} = 0.0609$ $p1 = 9.5242$ $p2 = -1.1742$	<u>Célula 14:</u> $\sigma_{\text{Estándar}} = 0.0081$ $p1 = 9.3414$ $p2 = -0.9890$
<u>Célula 5:</u> $\sigma_{\text{Estándar}} = 0.0064$ $p1 = 9.1445$ $p2 = -0.8844$	<u>Célula 10:</u> $\sigma_{\text{Estándar}} = 0.0361$ $p1 = 8.4448$ $p2 = -0.5517$	<u>Célula 15:</u> $\sigma_{\text{Estándar}} = 0.0014$ $p1 = 9.3180$ $p2 = -0.8377$

Tabla 4.5-1.- Valores obtenidos del ajuste voltaje frente al coseno del ángulo de incidencia.

## 5. NUEVA VERSIÓN DEL DRIVER DEL SENSOR SOLAR

A lo largo del capítulo 4 se ha desarrollado un modelado más preciso del comportamiento de las células solares. Este modelado se ha realizado con los datos obtenidos en la campaña de medición realizada, previa al lanzamiento, en el Spasolab. En consecuencia a este nuevo modelado, el DriverSS-UCM debe de incorporar las modificaciones oportunas.

- El modelado de las células fue realizado según una irradiancia correspondiente a la irradiancia solar en atmósfera cero. Sin embargo, como veremos en el apartado 5.1.- *Transformación del nivel de células a atmósfera cero (AM0)*, dicha irradiancia no resulta constante en vuelo para la duración de la misión NanoSat-1b.
- El modelado de las células solares ha sido modificado, en consecuencia será necesario modificar la matemática necesaria para obtener el voltaje normalizado, y la dirección del vector Sol.

Dichas modificaciones se desarrollan en los siguientes apartados.

### 5.1 CORRECCIÓN DE LA SEÑAL DE LAS CÉLULAS PARA ATMÓSFERA CERO (AM0)

A partir del modelado de las células, conocemos la respuesta de las mismas a una excitación lumínica correspondiente a la irradiancia solar en atmósfera cero (véase apartado 2.1.1 *Campaña de Medición en el Spasolab*). Sin embargo, en vuelo dicha

irradiancia no es constante. Por ello es necesario incluir una corrección sobre el nivel de las células solares.

### 5.1.1 Irradiancia Solar Media en Atmósfera Cero. Ciclo Solar

La irradiancia se define como el flujo energético por unidad de superficie. El conocimiento de la irradiancia solar en el exterior de la atmósfera terrestre resulta de suma importancia para poder estimar la respuesta de nuestras células solares en vuelo. La Organización Meteorológica Mundial (WMO) [Ref. 5] estableció en 1982 como irradiancia solar media en AM0 el valor de  $1367 \text{ W.m}^{-2}$ . Este valor es también recomendado por la Asociación Internacional de Meteorología y Física de la Atmósfera (IAMAP) [Ref. 6].

Sin embargo, la irradiancia solar presenta variaciones. La medición y el estudio de la irradiancia solar durante años han permitido detectar la presencia de un ciclo solar de duración aproximada de 11 años. El Centro Nacional de Datos Geofísicos (NGDC) y la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) de los EEUU [Ref. 7] facilitan datos tomados desde hace años por una gran variedad de misiones espaciales. En la figura 5.1.1-1 se muestra la irradiancia medida por diferentes satélites desde el año 1978 hasta el año 1999 [Ref. 7]. En dicha representación puede observarse como la variación de radiación media anual durante el ciclo solar tiene una variación aproximada del 0.1%.

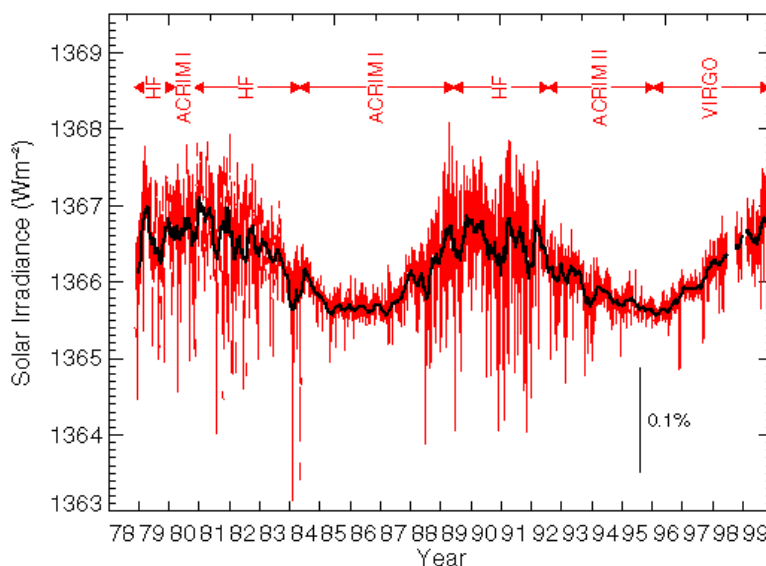


Figura 5.1.1-1.- Irradiancia Solar media anual (negro) y media diaria (rojo) desde el año 1978 al año 1999.

El hecho de que el ciclo solar sea de una duración de 11 años, y su variación del 0.1%, nos lleva a concluir que no será necesario el modelarlo e incluirlo en la transformación del nivel de células a AM0.

### 5.1.2 Variación de la Irradiancia Solar durante el año.

Otro aspecto que debe de tenerse en cuenta al estimar la irradiancia solar, es la variación de la distancia Tierra – Sol durante el año. Dicha variación dependerá de la excentricidad de la órbita terrestre.

#### 5.1.2.1 Variación de la Órbita Terrestre. Excentricidad

En realidad la órbita terrestre tampoco resulta constante. En un estudio realizado por Milutin Milanković durante la primera guerra mundial, con el objetivo de explicar los cambios climáticos [Ref. 8], se presentaron los ciclos de Milanković. Estos modelan, no solo la excentricidad, si no la orientación de la órbita terrestre con el tiempo. En la figura 5.1.2.1-1 se representa la excentricidad terrestre desde el año 2000 según los datos aportados por el Instituto de Mecánica Celeste y de Cálculo de Efemérides de Francia [Ref. 9]. La veracidad de este modelo matemático se mantiene hoy en día, aunque habrá que esperar unos miles de años para que pueda ser verificado.

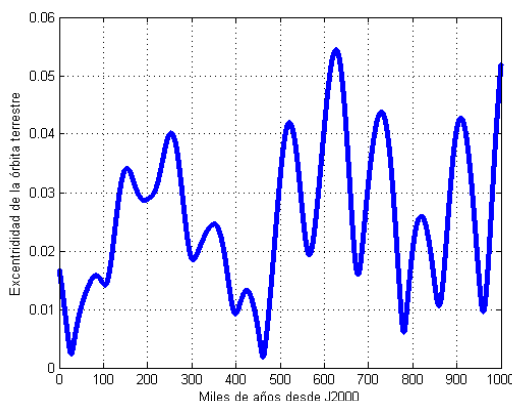


Figura 5.1.2.1-1.- Variación de la excentricidad de la órbita terrestre según los ciclos de Milanković.

A fecha de hoy la excentricidad de la órbita terrestre se establece en 0.01673, y dentro de 100 años disminuirá un 0.78%. Obviamente, no se considerará una variación en la excentricidad durante el tiempo de misión de NanoSat-1b.

#### 5.1.2.2 Corrección de la irradiancia según el día del año.

Teniendo fijada la excentricidad, podemos pasar a modelar la distancia Tierra – Sol a lo largo del año. En la ecuación 5.1.2.2-1 se muestra dicha distancia en unidades

astronómicas en función del día del año según el modelo de YANG, C. y A. VIDAL (1990) [Ref. 10].

$$R = \left( \frac{1 + e \cdot \cos\left(2\pi \cdot \frac{d-4}{365.25}\right)}{1 - e^2} \right)^{-1} \quad [\text{Ec. 5.1.2.2-1}]$$

En la figura 5.1.2.2-1 se representa el factor  $1/R^2$  en función del día del año. En dicha representación se observa una variación del  $\pm 3.3\%$ .

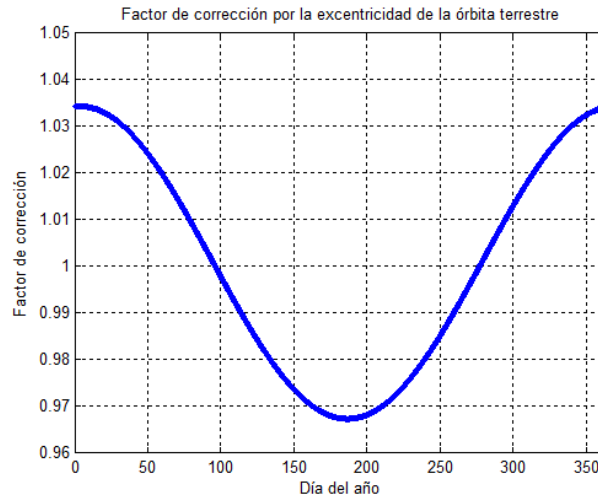


Figura 5.1.2.2-1.- Factor de corrección en la irradiancia solar por la excentricidad de la órbita terrestre.

Para estimar el día del año en el sistema de NanoSat-1b, se cuenta con el tiempo universal Y2K. Dicho tiempo cuenta los segundos transcurridos desde el 1 de Enero del 2000 a las 00:00.

Puesto que la irradiancia resulta inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, la irradiancia esperada para un cierto día del año  $d$ , queda expresada según la ecuación [Ec. 5.1.2.2-2].

Siendo la respuesta en intensidad de las células solares proporcional a la irradiancia recibida, podremos expresar la ecuación [Ec. 5.1.2.2-2] según la ecuación [Ec. 5.1.2.2-3].

$$Irr(d) = Irr_{AM0} / R(d)^2 \quad [\text{Ec. 5.1.2.2-2}] \quad I_{Medida} = I_{AM0} / R(d)^2 \quad [\text{Ec. 5.1.2.2-3}]$$

Para poder incluir este efecto sobre el nivel de las células solares (voltaje), deberemos de transformar esa intensidad a voltaje según hace la electrónica de sensores en vuelo. Dicha transformación se muestra en la ecuación [Ec. 5.1.2.2-4].

$$\frac{V_{Medido} - V_{offset_{SS}}}{Gan_{SS}} = \frac{V_{AM0} - V_{offset_{SS}}}{Gan_{SS}} \frac{1}{R(d)^2}$$

$$V_{Medido} - V_{offset_{SS}} = (V_{AM0} - V_{offset_{SS}}) \frac{1}{R(d)^2}$$

$$V_{AM0} = V_{Medido} \cdot R(d)^2 + (1 - R(d)^2) V_{offset_{SS}} \quad [\text{Ec. 5.1.2.2-4}]$$

De este modo, según el día del año se corrige la señal en voltaje de las células, al caso de una irradiancia solar media en atmosfera cero. En consecuencia, que con esta corrección podremos tratar las células solares en vuelo con el modelado que se realizó en el capítulo 4.- *Modelado de las células solares por UCM*.

### 5.1.3 Problemática en la corrección de la señal de las células solares.

La corrección realizada en la ecuación [5.1.2.2-4] sobre el nivel de las células solares presenta un conflicto con una de las decisiones tomadas anteriormente. Recordemos que la respuesta natural de las células solares a la excitación lumínica es la intensidad. El hecho de que se registre voltaje, es por los amplificadores operacionales de la electrónica de sensores, los cuales fueron calibrados en tierra. Puesto que no se tiene la certeza de que los valores de dicha calibración se mantengan invariantes, en el capítulo 4 se propuso el modelar la célula solar respecto al voltaje. Pero en la ecuación [Ec. 5.1.2.2-4] necesitamos hacer uso del offset dado en la electrónica de sensores.

Este problema tiene solución, puesto que el offset dado en la electrónica de sensores es la señal registrada en las células solares durante el eclipse, es decir, para intensidad nula.

De este modo, se promedia el offset para diferentes experimentos durante todo el eclipse, obteniendo dichos valores en vuelo para la fecha actual.

En la tabla 5.1.3-1 se muestran los valores calibrados en vuelo para el offset de la electrónica de sensores.

$V_{Offset_{SS}}$ (Voltios)		
Sensor Solar A	Sensor Solar B	Sensor Solar C
$V_{Offset_{SS1}} = 0.3466$	$V_{Offset_{SS6}} = 0.3456$	$V_{Offset_{SS11}} = 0.3446$
$V_{Offset_{SS2}} = 0.3452$	$V_{Offset_{SS7}} = 0.3456$	$V_{Offset_{SS12}} = 0.3450$
$V_{Offset_{SS3}} = 0.3452$	$V_{Offset_{SS8}} = 0.3456$	$V_{Offset_{SS13}} = 0.3458$
$V_{Offset_{SS4}} = 0.3461$	$V_{Offset_{SS9}} = 0.3455$	$V_{Offset_{SS14}} = 0.3452$
$V_{Offset_{SS5}} = 0.3456$	$V_{Offset_{SS10}} = 0.3455$	$V_{Offset_{SS15}} = 0.3444$

Tabla 5.1.3-1.- Valores de Offset de la electrónica de sensores calibrados en vuelo.

El valor obtenido en vuelo del offset, difiere del calibrado en tierra entre un 0.7% y un 1.8% dependiendo de la célula.

## 5.2 NORMALIZACIÓN Y OBTENCIÓN DEL VECTOR SOL SEGÚN EL MODELADO POR LA UCM

Una vez disponemos de la señal de voltaje de las células solares adecuada al caso de una irradiancia dada en AM0, podremos aplicar el nuevo modelado de las mismas según la calibración realizada en tierra (véase capítulo 4.- *Modelado de las Células Solares por la UCM*). Recordando el modelo realizado en la ecuación [Ec. 4.3-1], podremos despejar el coseno del ángulo de incidencia según la ecuación [Ec. 5.2-1].

$$\frac{V_{AM0} - p2'}{p1'} = \cos(\alpha) = V_{Norm} \quad [\text{Ec. 5.2-1}]$$

De este modo tendremos el voltaje normalizado,  $V_{Norm}$ . Siendo  $\alpha$  el ángulo entre la normal de la célula y el vector sol, el coseno de  $\alpha$  representará en producto escalar entre la normal de la célula y el vector Sol normalizado, tal y como muestra la ecuación [5.2-2].

$$V_{Norm} = \cos(\alpha) = \frac{n_{cel} \cdot \overrightarrow{Sol}}{|\overrightarrow{Sol}|} = n_{cel} \cdot Sol \quad [\text{Ec. 5.2-2}]$$

Para poder determinar la dirección del vector en tres dimensiones, necesitaremos la información de por lo menos tres células solares. De esta forma expresaremos la ecuación [Ec. 5.2-2] matricialmente en la expresión [Ec. 5.2-3].

$$\begin{pmatrix} V_{Norm1} \\ V_{Norm2} \\ V_{Norm3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} n_{x1} & n_{y1} & n_{z1} \\ n_{x2} & n_{y2} & n_{z2} \\ n_{x3} & n_{y3} & n_{z3} \end{pmatrix}_{SBF} \cdot \begin{pmatrix} Sol_x / |\overrightarrow{Sol}| \\ Sol_y / |\overrightarrow{Sol}| \\ Sol_z / |\overrightarrow{Sol}| \end{pmatrix}_{SBF} \quad [\text{Ec. 5.2-3}]$$

La forma de obtener el vector Sol en ejes satélite (SBF) se expresa en la ecuación [5.2-4].

$$\begin{pmatrix} \frac{Sol_x}{|\vec{Sol}|} \\ \frac{Sol_y}{|\vec{Sol}|} \\ \frac{Sol_z}{|\vec{Sol}|} \end{pmatrix}_{SBF} = Sol = \begin{pmatrix} n_{x1} & n_{y1} & n_{z1} \\ n_{x2} & n_{y2} & n_{z2} \\ n_{x3} & n_{y3} & n_{z3} \end{pmatrix}_{SBF}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} V_{Norm1} \\ V_{Norm2} \\ V_{Norm3} \end{pmatrix} \quad [\text{Ec. 5.2-4}]$$

Las matrices necesarias para obtener el vector Sol mediante los voltajes normalizados, se encuentran precalculadas, puesto que el proceso de invertir matrices resulta costoso computacionalmente. De este modo, tendremos que tener precalculada una matriz 3 x 3 por cada una de las combinaciones de tres células.

Las normales de las células en ejes sensor han sido tomadas del documento interno del INTA sobre ejes, nomenclatura y direcciones en ejes cuerpo de los sensores solares de NanoSat-1b [Ref. 11].

## 6. REAJUSTE DE LA ORIENTACIÓN DE LA CÉLULA SOLAR SS14

Pocos días antes del lanzamiento de NanoSat-1b, desde el Cosmódromo de Baikonour en Kazajistán, se detectó la desviación de una de las células solares. En la figura 6-1 se muestra una imagen del modelo *Flight Model* (FM) de NanoSat-1b, donde se aprecia la desviación mencionada. Los responsables correspondientes comprobaron que la célula no se encontraba suelta, y que la sujeción era la debida pese a la desviación. Con lo que podremos suponer que dicha célula mantiene una desviación constante.



Figura 6-1.- Célula solar SS14 del modelo FM desviada. Fotografía tomada en el Cosmódromo de Baikonour.

De esta manera, se plantea para este trabajo el obtener la desviación presente en la célula SS14. Dicha estimación deberá de hacerse sobre telemetrías obtenidas en vuelo. Se ha seleccionado uno de los experimentos de apuntamiento al Sol con el sensor SSC de duración de una órbita. Sin embargo, únicamente utilizaremos los valores en los que

el Sol, el satélite y la tierra se encuentran alineados, tal y como se muestra en la figura 6-2. La razón de situarnos en ese instante, se fundamenta con el hecho de evitar los efectos del albedo (reflejo de la luz del Sol sobre la tierra junto a emisión infrarroja de la misma), puesto que el sensor SSC queda orientado al Sol, y cubierto del albedo por la sombra del propio satélite.

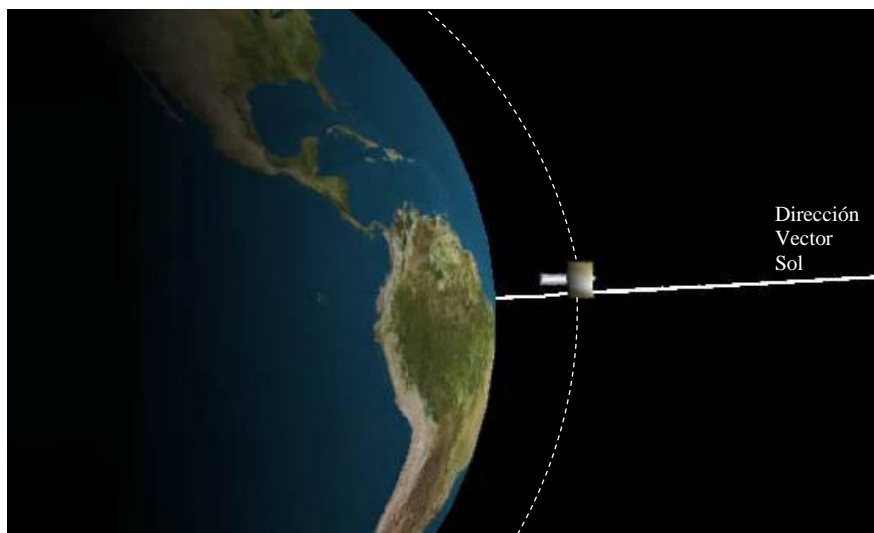


Figura 6-2.- Captura del simulador de ACS para NanoSat-1b. Instante de alineamiento entre satélite, Sol y Tierra.

En la figura 6-3 se muestra el nivel obtenido por las cinco células del sensor SSC. En dicha representación se comprueba que no hay presente ninguna sombra de los cuatro monopolos situados en la cara superior (véase Fig. 6-1).

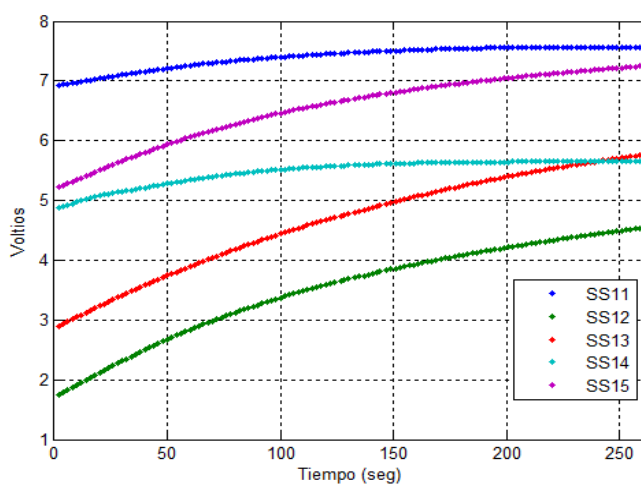


Figura 6-3.- Señal de células del sensor SSC durante el experimento de apuntamiento al Sol con el mismo.

Escogiendo una combinación de tres células, e introduciendo esta señal de células al driver-UCM versión 2, diseñado en este trabajo, obtendremos la dirección del Sol. Todas las combinaciones de tres células posibles, pertenecientes al sensor SSC, están representadas en la tabla 6-1.



Combinaciones de tres células en el sensor SSC							
[11 13 15]	[12 13 15]	[11 12 13]	[12 14 15]	[11 14 15]	[11 12 14]	[12 13 14]	[11 13 14]

Tabla 6-1.- Combinaciones posibles de tres células pertenecientes al sensor SSC.

En la figura 6-4 se muestra la dirección del Sol y su módulo, obtenidos por todas las combinaciones presentes en la tabla 6-1. Se representan con puntos aquellas combinaciones que no incorporan la célula 14, y en línea continua las combinaciones que si incluyen la célula 14. También se incluye, representada en línea negra continua, la dirección y módulo del vector Sol obtenido mediante la media de aquellas combinaciones que no incluyen la célula 14.

Se puede observar en la figura 6-4 como todas las combinaciones que no incluyen la célula 14 se encuentran convergentes en una misma solución, mientras que aquellas que la incorporan se separan de la solución real.

Para reajustar la orientación de la normal de la célula 14, se lanza entonces un proceso de optimización en su búsqueda. Para ello se utilizará la función *fmincon*, de la librería *Optimization toolbox* de Matlab® [Ref. 12].

Para el proceso de optimización, trataremos un vector de estado de 2 componentes:

$X_1$ : Ángulo con eje de rotación  $+X_{SSC}$

$X_2$ : Ángulo con eje de rotación  $+Y_{SSC}$

Los ejes de rotación  $+X_{SSC}$  y  $+Y_{SSC}$  pueden observarse en la figura 6-1.

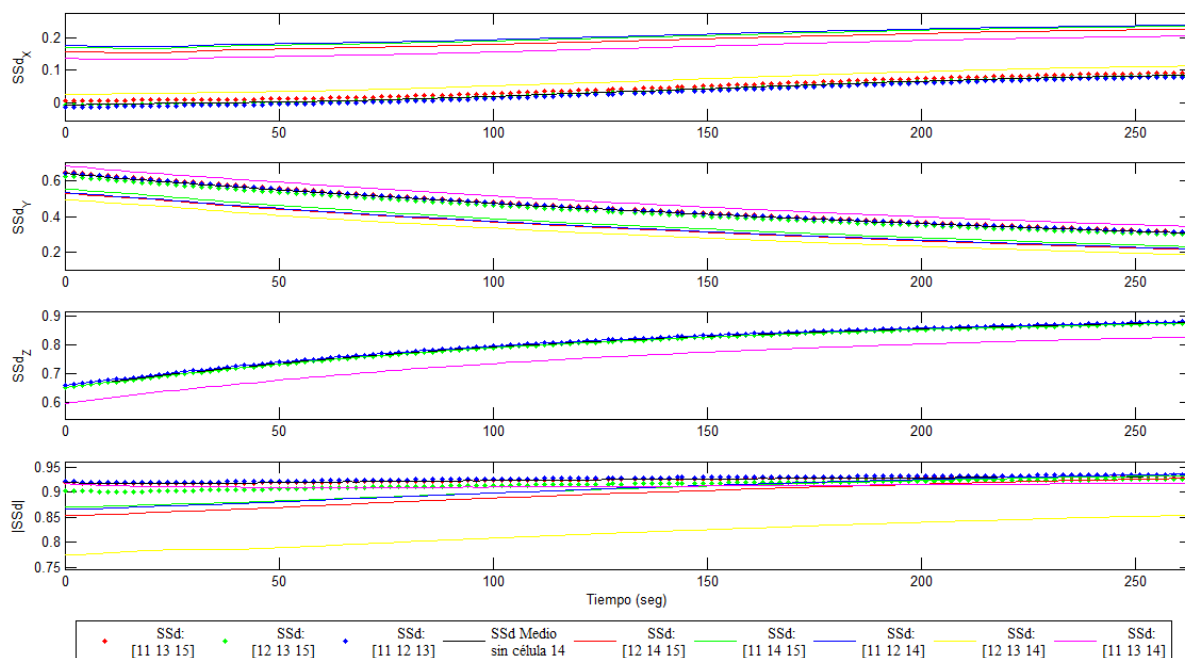


Figura 6-4.- Sol obtenido con todas las combinaciones posibles de tres células pertenecientes al sensor SSC.

La función de coste se definirá como el sumatorio extendido a todas las combinaciones que incorporan la célula 14, del ángulo formado entre el vectores Sol obtenido con el vector Sol promedio de las combinaciones que no incluyen la célula 14 [Ec. 6-1].

$$\sum_{t=0}^{T_{fin}} \left\{ \sum_{i=1}^N \arccos \left( SSd_{i\text{ ConCélula14}} \cdot \frac{\sum_{j=1}^M SSd_j \sin \text{Célula14}}{M} \right) \right\} \quad [\text{Ec. 6-1}]$$

$N = \text{Total de combinaciones con célula 14.}$   
 $M = \text{Total de combinaciones sin célula 14.}$   
 $T_{fin} = \text{Tiempo de fin de experimento.}$

Sin embargo, al tratarse de dos rotaciones con ejes perpendiculares entre si, el mínimo de la primera rotación resulta independiente de la segunda rotación. Por ello el problema puede resolverse por dos métodos de optimización por separado, manteniendo la configuración de la función de coste. De esta manera se simplifica enormemente el problema, llegando a la solución óptima:  $[X_1 = +28.56^\circ ; X_2 = -6.09^\circ]$

En la figura 6-5 se muestra el resultado obtenido por todas las combinaciones, una vez reajustada la normal de célula 14. Se ha mantenido la escala presente en la figura 6-4 para poder ser compararlas.

Los valores de la función de conste en las tres etapas de la optimización, han sido:

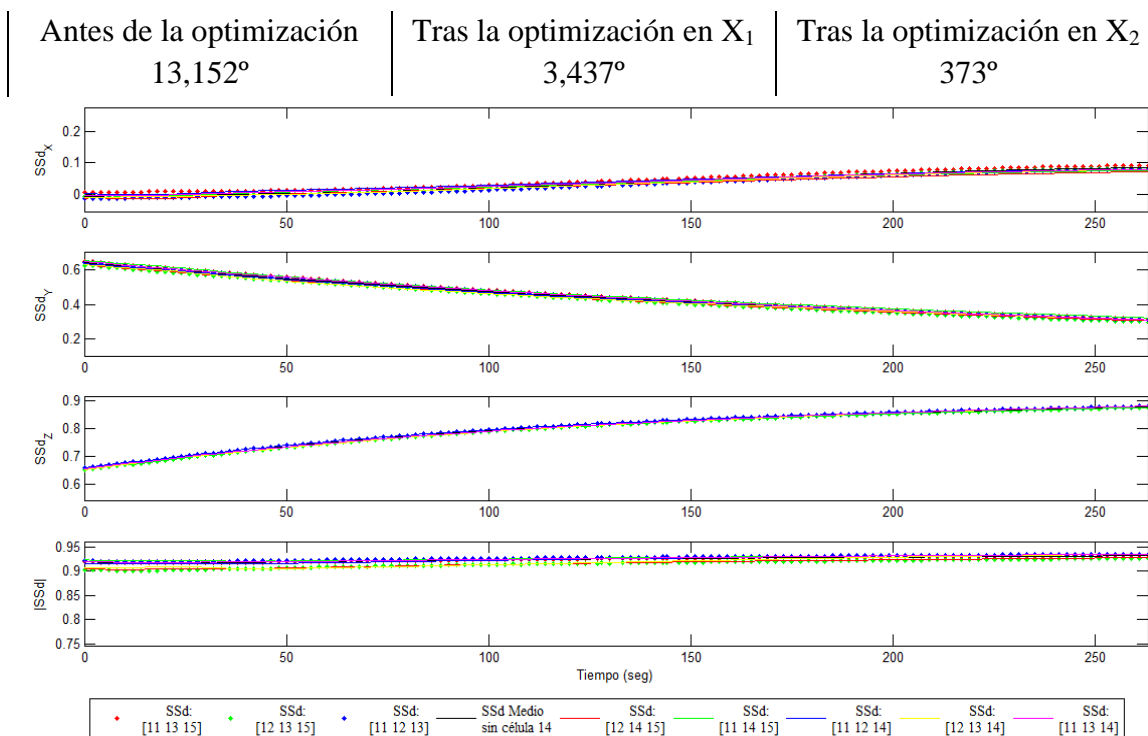


Figura 6-5.- Sol obtenido con todas las combinaciones posibles de tres células pertenecientes al sensor SSC tras optimizar la orientación de la célula SS14.

Los resultados mostrados en la figura 6-5 demuestran que finalmente se ha conseguido alcanzar un funcionamiento preciso y coherente del sistema de sensores solares gracias al correcto modelado de las células solares, de la irradiancia solar, y del reajuste en la orientación de la célula SS14. Sin embargo estos son únicamente los resultados obtenidos para el sensor SSC, por lo que en el siguiente capítulo se muestran los resultados obtenidos para experimentos correspondientes a los sensores SSA y SSB.

## 7. VALIDACIÓN DEL NUEVO DRIVERSS-UCM EN VUELO

En el presente capítulo se evaluará la precisión del nuevo DriverSS-UCM, mediante resultados experimentales obtenidos en vuelo. Estos resultados serán comparados a los obtenidos con la primera versión del DriverSS-UCM.

### 7.1 APUNTAMIENTO AL SENSOR SOLAR SSA

Mediante un experimento de apuntamiento con el sensor solar SSA, se obtienen telemetrías que son inyectadas en el nuevo DriverSS-UCM. Con los resultados obtenidos, se evaluará la precisión en la estimación del vector Sol.

Los datos del experimento utilizados son aquellos en los que el Sol, el Satélite y la Tierra se encuentran alineados, para evitar distorsiones por el albedo terrestre.

En la figura 7.1-1 se muestran los resultados obtenidos mediante el DriverSS-UCM versión 1, y los resultados obtenidos mediante el DriverSS-UCM versión 2. En ambas representaciones se ha mantenido la escala para poder ser comparadas.

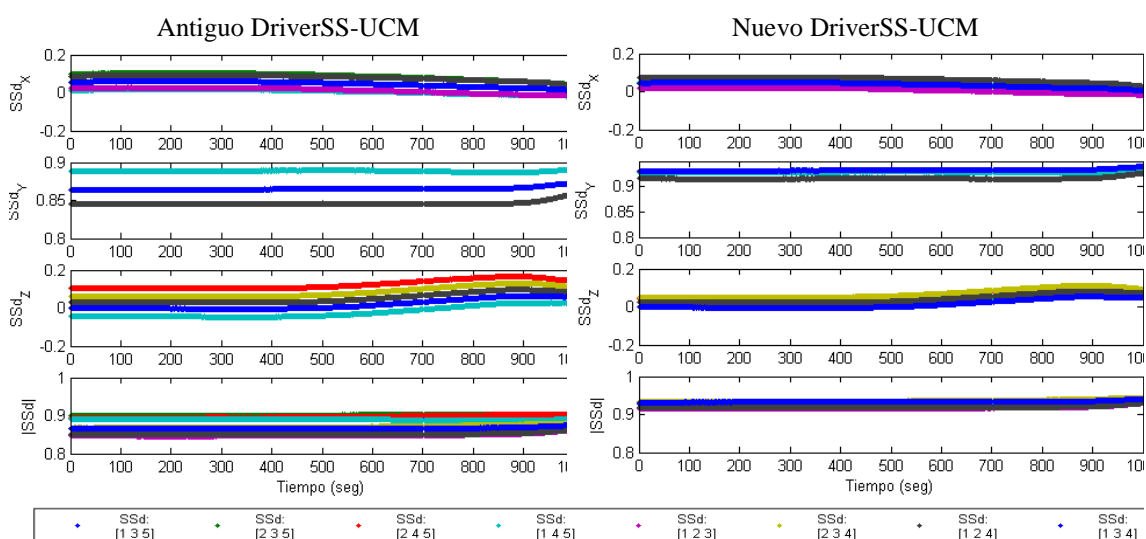


Figura 7.1-1.- Resultados obtenidos en apuntamiento con sensor SSA para ambas versiones del DriverSS-UCM.

Para poder evaluar la precisión del nuevo DriverSS-UCM, se obtendrá para cada una de las combinaciones el ángulo formado por su vector Sol, con el vector Sol promedio.

En la figura 7.1-2 se representan los ángulos formados por cada uno de los vectores Sol con el promediado.

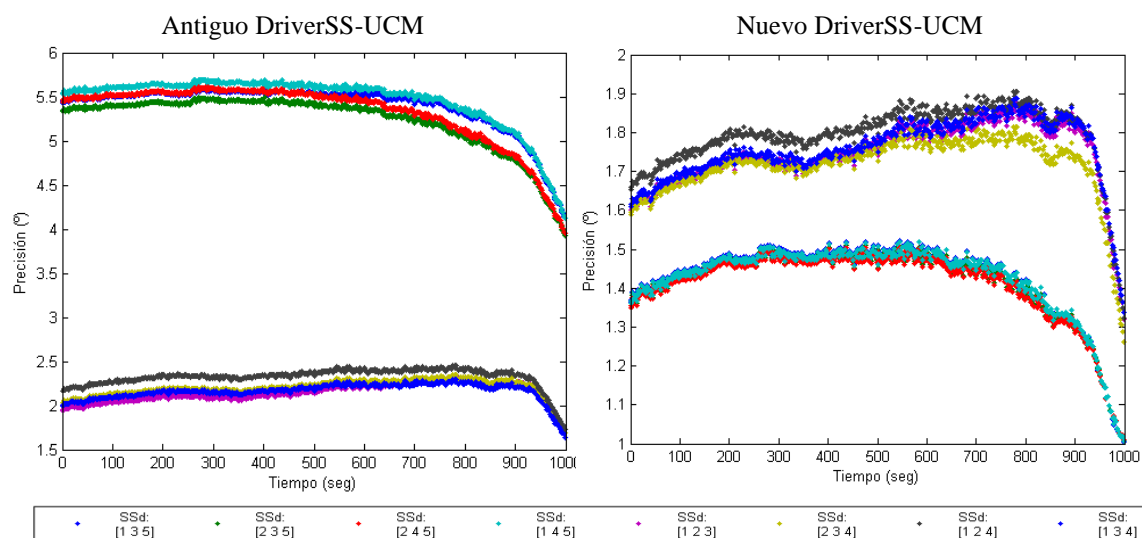


Figura 7.1-2.- Precisión de los sensores solares para el experimento de apuntamiento a SSA.

En primer lugar, se observa que inicialmente se tenían errores de apuntamiento de  $5.55^\circ$  como máximo, mientras que para la nueva versión del driver se ha alcanzado una precisión de apuntamiento de  $1.90^\circ$ .

En segundo lugar, denotar que aparecen claramente dos bandas en la precisión de apuntamiento. Esto es debido a la geometría de las combinaciones de las tres células escogidas. Para formar grupos de tres células dentro de un mismo sensor, se escogen con dos simetrías diferentes. En la figura 7.1-3 se muestran las dos simetrías mencionadas.

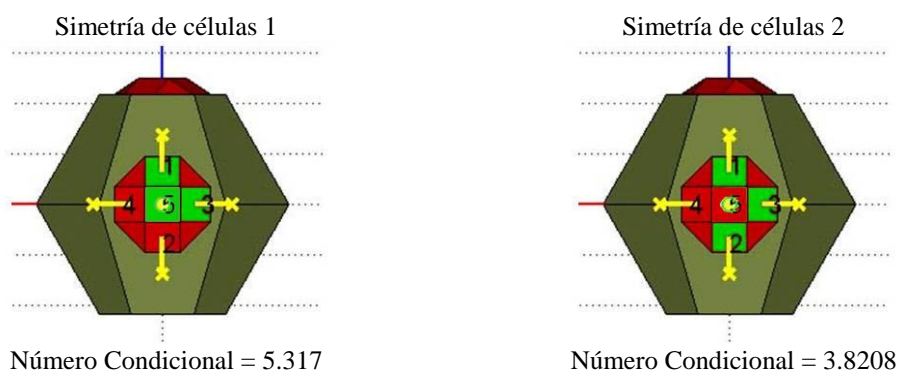


Figura 7.1-3.- Simetrías en las combinaciones de tres células en un mismo sensor.

Rotando  $90^\circ$  cada una de las simetrías, obtendríamos las ocho combinaciones de células escogidas. La diferencia de nuestros resultados al escoger una simetría u otra radica en la ortogonalidad de nuestras tres normales. Cuanto más alineadas estén las normales, más sensible es el resultado a variaciones. En las versiones actuales de driver, se modela dicha ortogonalidad mediante el número condicional de la matriz de normales.

El número condicional para cada una de las simetrías, se muestra en la figura 7.1-3, quedando justificadas las dos bandas presentes.

## 7.2 APUNTAMIENTO AL SENSOR SOLAR SSB

Utilizando la misma metodología que en el apartado 7.1, se estimará la precisión del nuevo DriverSS-UCM, mediante un experimento de apuntamiento al Sol con el sensor SSB. Nuevamente se utilizarán aquellos puntos de la órbita en los que Sol, Satélite y Tierra se encuentran alineados, con el objetivo de cubrir el sensor SSB del albedo.

En la figura 7.2-1 se muestran los resultados del experimento para las dos versiones del DriverSS-UCM. En dicha figura, nuevamente se observa la mejora en la convergencia de los vectores Sol estimados por cada una de las combinaciones.

Para estimar la precisión del nuevo DriverSS-UCM, obtendremos el ángulo formado por cada uno de los vectores Sol con el promediado, tal y como se hizo en el apartado 7.1

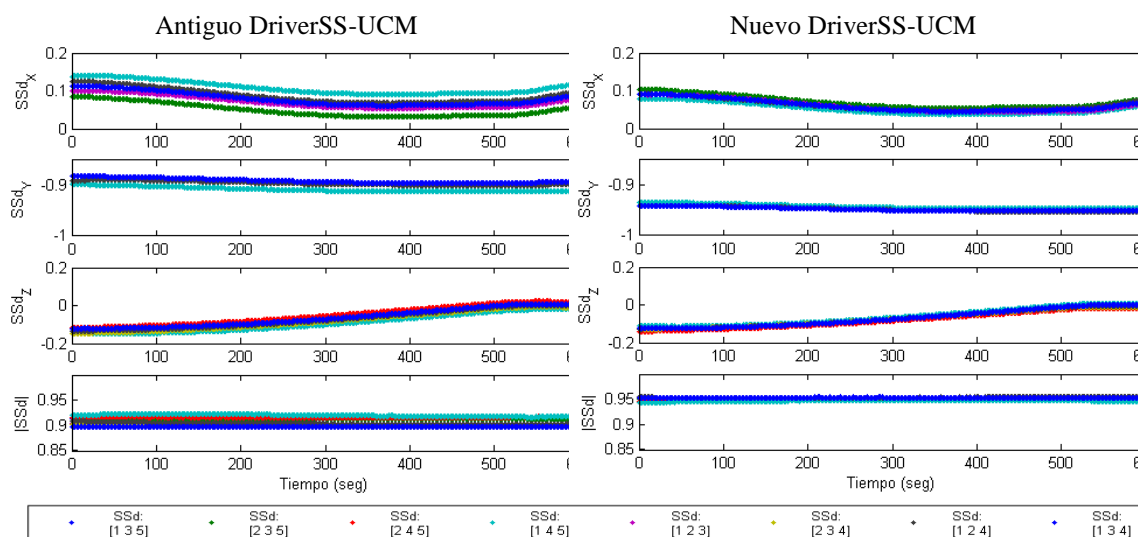


Figura 7.2-1.- Resultados obtenidos en apuntamiento con sensor SSB para ambas versiones del DriverSS-UCM.

En la figura 7.2-2 se muestra el ángulo formado por todos los vectores Sol con el promediado, para las dos versiones del DriverSS-UCM.

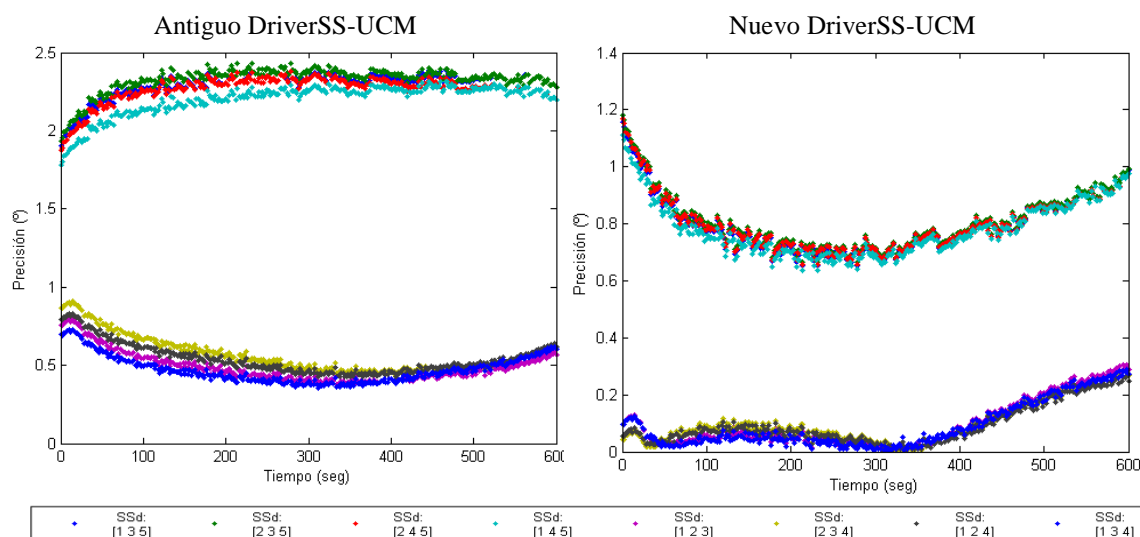


Figura 7.2-2.- Precisión de los sensores solares para el experimento de apuntamiento a SSB.

Se observa como la nueva versión del DriverSS-UCM ha mejorado la precisión del vector Sol de  $2.49^\circ$  a  $1.20^\circ$ . Otro hecho que se observa, es la presencia de dos bandas claramente diferenciadas. Esto es debido a la simetría de las células solares escogidas para determinar el vector Sol, lo cual ya fue comentado en el apartado 7.1 (véase figura 7.1-3).

### 7.3 APUNTAMIENTO AL SENSOR SOLAR SSC

Los resultados para el experimento de apuntamiento al sensor solar SSC, fueron mostrados en la figura 6-5, donde fue necesario un reajuste sobre la orientación de la normal en la célula SS14.

De este modo, directamente se procede a presentar en la figura 7.3-1 la precisión obtenida por las dos versiones del DriverSS-UCM.

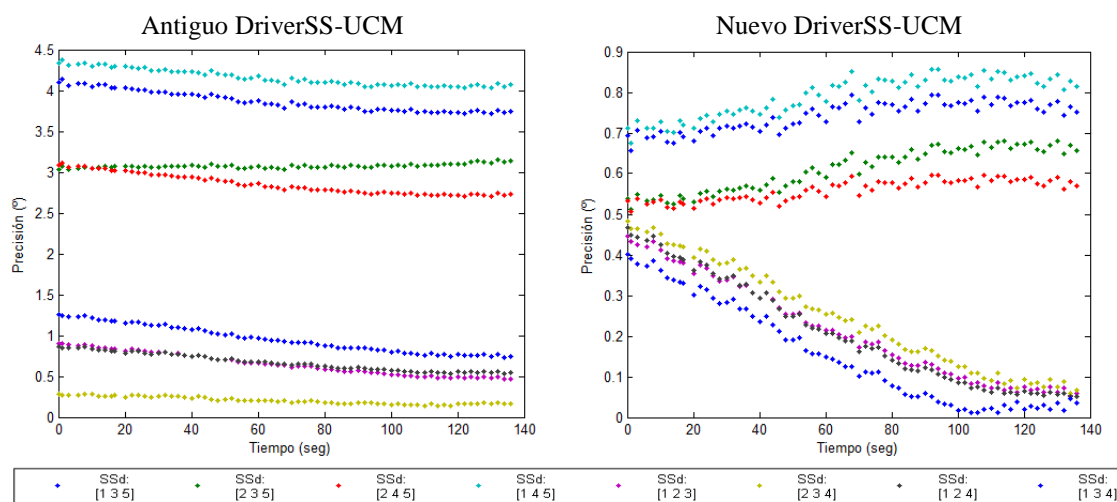


Figura 7.3-1.- Precisión de los sensores solares para el experimento de apuntamiento a SSC.

Este caso difiere de los mostrados en los apartados 7.1 y 7.2, puesto que para la nueva versión, la orientación de la célula SS14 fue reajustada. De este modo, la precisión ha sido mejorada notablemente de una versión a otra. Se ha logrado una precisión en la estimación del vector Sol de  $0.9^\circ$ , partiendo de una precisión de  $4.5^\circ$ .

Otro aspecto a denotar, es que las bandas presentes en los apartados 7.1 y 7.2, han convergido notablemente al realizar el reajuste de la normal en la célula 14.

## **8. CONCLUSIONES**

La motivación del presente trabajo se vio fomentada por la presencia de saltos en la dirección del vector Sol estimado por el DriverSS-UCM, Versión 1. El objetivo final de dicho trabajo se fijó en hacer converger los vectores Sol obtenidos por diferentes células solares, al vector promediado. Dicha convergencia debería de alcanzarla un proceso de optimización, el cual actuase sobre las variables presentes en el modelado de las células solares. Sin embargo un profundo análisis desde la base del sistema de los sensores solares, nos ha obligado a partir del primer paso en el desarrollo del sistema, el modelado y la calibración de las células solares.

Partiendo de la información suministrada por el INTA, y de los datos tomados en la campaña de calibración de los sensores solares, se ha mejorado el modelado y calibración de las células solares frente al que había ya integrado. Este nuevo modelado nos ha obligado a desarrollar una nueva metodología en la obtención de la dirección del Sol, teniendo que modificar el Driver.

Puesto que la calibración fue realizada para la irradiancia media en atmósfera cero (constante solar), el sistema de sensores solares debería de ser capaz de transformar en vuelo la señal de sus células al caso de dicha irradiancia. Por ello se ha desarrollado un completo modelo de la irradiancia solar para el tiempo de misión de NanoSat-1b, y en coherencia, la corrección necesaria en la señal de las células solares (voltaje). Dicha corrección incluye un parámetro perteneciente a la electrónica de sensores, el cual fue calibrado en tierra y es susceptible de haber sufrido variaciones. Afortunadamente, se ha encontrado la forma de estimar dicho parámetro a partir de telemetrías de vuelo.

En el comienzo de este trabajo se conocía la desviación de una de las células solares, la cual fue detectada pocos días antes del lanzamiento. El uso de dicha célula ha sido descartado desde el lanzamiento. Por ello se propuso como nuevo objetivo el reajustar la orientación de dicha célula mediante telemetrías tomadas en vuelo. Para ello se lanzó el proceso de optimización que haría converger todos los vectores Sol al promediado. Se

ha reajustado la orientación de la célula SS14, obteniendo resultados muy prometedores, que inducen a recalibrar todas las direcciones de las células.

Finalmente se han obtenido resultados sobre datos tomados en vuelo para diferentes situaciones, comparando el sistema de sensores solares, antes y después de la realización de este trabajo. En dichos resultados se refleja notablemente la mejora conseguida con el presente trabajo, estimando de esta manera la precisión conseguida para el sistema de sensores solares.

Estas conclusiones se pueden resumir en los siguientes puntos:

1. Se ha modelado de forma precisa el comportamiento de las células solares.
2. Se ha realizado una nueva calibración acorde al nuevo modelo.
3. Se ha incluido un modelo de irradiancia solar, mediante el cual corregir las señales de las células solares en función de la época del año.
4. Se ha reajustado la orientación de una de las células solares con datos tomados en vuelo, la cual fue detectada pero no estimada antes del lanzamiento.
5. Se han introducido todas las mejoras en el nuevo DriverSS-UCM.
6. Se ha calificado el correcto funcionamiento del nuevo driver, mostrando la notable mejoría frente a la versión anterior.

Es importante destacar el hecho de que el estudio de este sistema de sensores solares, por parte del grupo de control de actitud de la UCM para el INTA, comenzó en el año 2008. Desde entonces se ha ido adquiriendo un importante conocimiento sobre el mismo. De este modo, en el momento de realizar el presente trabajo, se disponía de datos y conocimientos suficientes como para rediseñar el sistema desde su base, justificando teóricamente y después de forma empírica todos los procedimientos realizados.



## **9. TRABAJOS FUTUROS**

Mediante los resultados obtenidos en la calificación del nuevo sistema de sensores solares, se ha mostrado la sensibilidad de los resultados a la correcta estimación de la orientación en las células solares. Mediante el ajuste de la célula solar 14, se ha conseguido mejorar notablemente la precisión del sensor SSC, frente a los sensores SSA y SSB. Esto parece indicar que recalibrando todas las direcciones en vuelo se podría obtener una precisión inferior al grado, tal y como muestra actualmente el sensor SSC.

En el presente trabajo se ha obviado un factor importante, con el que se debe lidiar en la obtención de la dirección del vector Sol, el albedo. Los datos analizados, y los resultados obtenidos en ellos, están tomados en situaciones para las cuales el efecto del albedo se ve evitado por la sombra del propio satélite (apuntamiento al Sol con el sensor, y con el Sol, satélite y tierra alineados).

Sin embargo existe un profundo estudio sobre las combinaciones de células a utilizar en función del modo de control de apuntamiento activado. Este estudio se inició antes de este trabajo de recalibración del driver, pero las imprecisiones de este no permitían profundizar en él. Una vez recalibrado el driver será posible introducir en el mismo la detección de albedo.

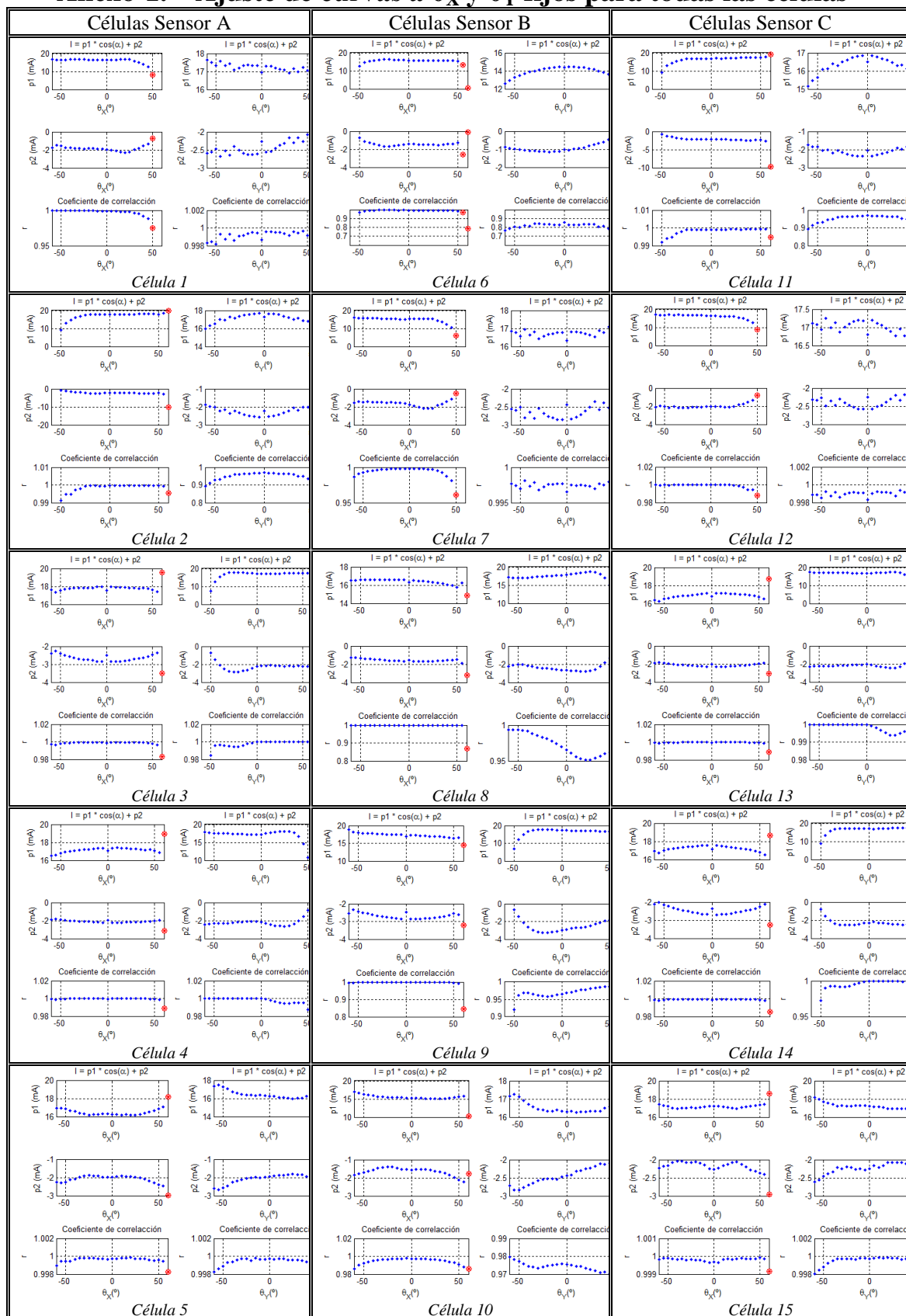
En el subsistema de control de actitud de NanoSat-1b, el sistema de sensores solares debe aportar su medida a los procesos de determinación de actitud y de control. Es necesario evaluar cómo ha mejorado la precisión del ACS gracias a este incremento de precisión en los sensores solares.

**BIBLIOGRAFÍA**

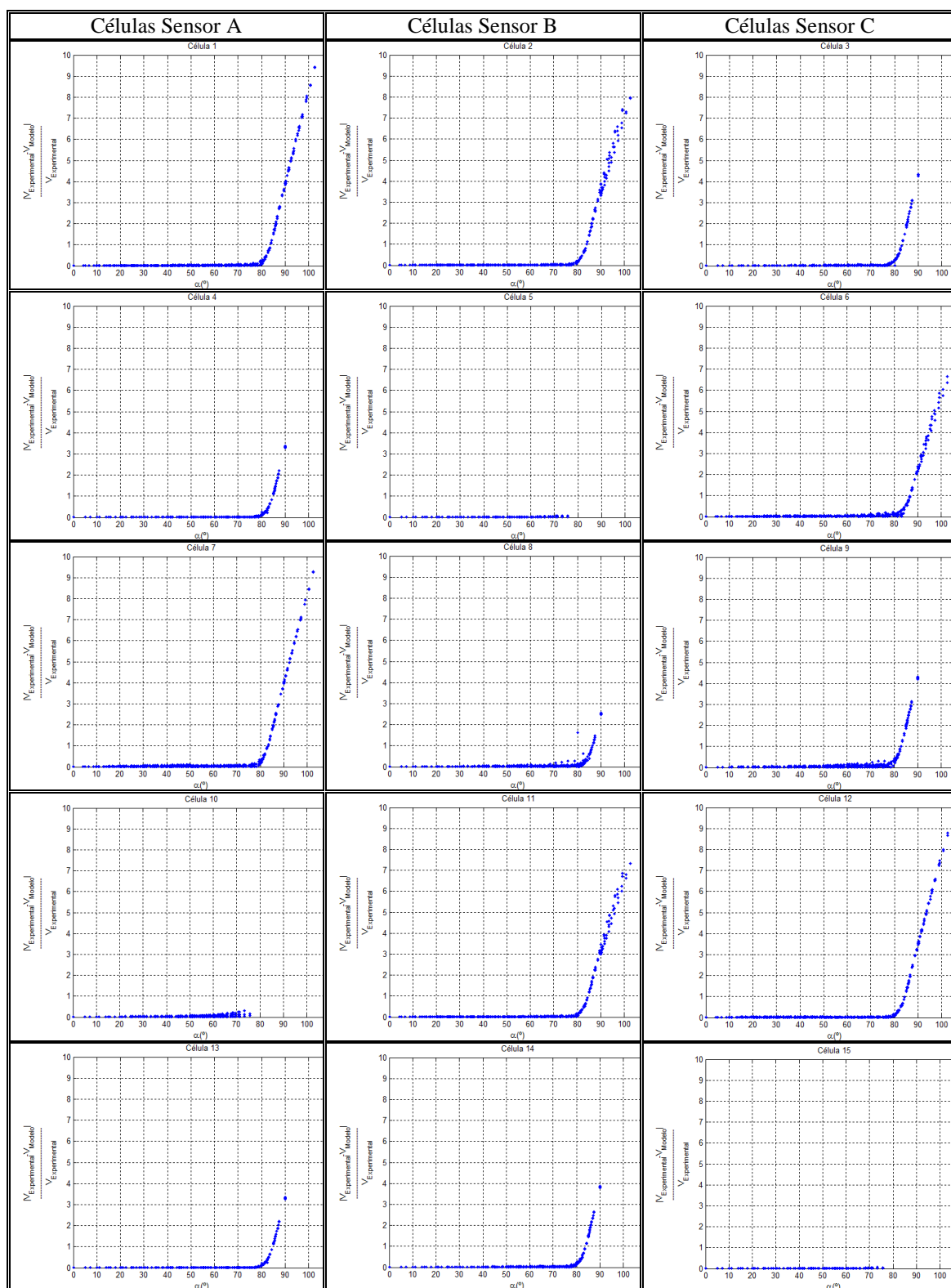
- [1] NST1B-INT-V73-TPR-03. *Procedimiento de calibración de sensor solar FM*. Documentación interna del INTA.
- [2] INTA. *Notas técnicas DriverSS-INTA*. Pedro de Vicente. Personal INTA.
- [3] U.A. Bakshi & V.U. Bakshi. *Electrical Technology*. Technical Publications Pune. 2009.
- [4] Lafortune, E.P., And Willems, Y.D. *Using the Modified Phong Reflectance Model for Physically Based Rendering*. Report CW 197, Dept. of Computer Science, K.U. Leuven, November 1994, p. 2-4.
- [5] World Meteorologic Organization (1982). *Comission for instruments and methods of observation*. Abridged Final Report of the 8th Session, WMO-#590, Geneva. Citat en el llibre blau del CREA que conté disquets (Applied Environmetric Meteorological Tables, de Tom Beer), p. 19 & p. 21.
- [6] LONDON, J. y C. FROHLICH (1982) Extended abstracts presented at the symposium on the solar constant and the spectral distribution of solar irradiance. International Association of Meteorology and Atmospheric Physics. Third Scientific Assembly. Hamburg. Federal Rep. of Germany, 17-28 Aug. 1981. IAMAP. Innsbruck. Austria.
- [7] The National Geophysical Data Center (NGDC), National Oceanic & Atmospheric Administration (NOAA). Web: <http://www.ngdc.noaa.gov/>
- [8] Milankovitch, Milutin (1998) [1941]. *Canon of Insolation and the Ice Age Problem*. Belgrade: Zavod za Udžbenike i Nastavna Sredstva. ISBN 8617066199.; see also "Astronomical Theory of Climate Change".
- [9] A&A 428, 261-285 (2004), Laskar, J., Robutel, P., Joutel, F., Gastineau, M., Correia, A.C.M., Levrard, B. : 2004, A long term numerical solution for the insolation quantities of the Earth.
- [10] YANG, C. y A. VIDAL (1990) "Combination of Digital Elevation Models with SPOT-1 HRV Multispectral Imagery for Reflectance Factor Mapping." *Remote Sensing of Environment*, p. 32:35-45.
- [11] *Ejes, nomenclatura y direcciones en ejes cuerpo de los sensores solares en NanoSat-1b*. Documentación interna del INTA.
- [12] *Product Documentation, MathWorks*. Ayuda online de Matlab®. Web: <http://www.mathworks.es/help/index.html>

# ANEXO

## Anexo-1. Ajuste de curvas a $\theta_X$ y $\theta_Y$ fijos para todas las células



## Anexo-2. Error relativo cometido por el modelo de célula solar



### Anexo-3. Ajuste del Voltaje frente al ángulo de incidencia para las 15 células

